

Хмельницький національний університет
Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

Розробка мікропроцесорної системи керування асинхронним двигуном

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Шифр, назва

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Шифр, назва

Освітня програма «Енергетичний менеджмент»

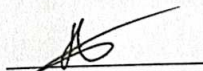
Шифр БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Виконав студент 4 курсу
група ЕМ-21-1


Підпис

В. М. Якунін
Ініціали, прізвище

Керівник


Підпис, дата

С. І. Пундик
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер


Підпис, дата

О. Г. Тимошук
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:


Підпис, дата

В. С. Неймак
Ініціали, прізвище

Зав. кафедри МАЕЕС
2 06 2025 р.

Хмельницький 2025

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури

Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

Освітній рівень бакалавр


Галузь знань 14 Електрична інженерія

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Шифр і назва

Освітня програма Енергетичний менеджмент
Шифр і назва

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАЕЕС


2.06.2025

ЗАВДАННЯ
НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Якунін Вадим Михайлович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи Розробка мікропроцесорної системи керування асинхронним двигуном

керівник роботи Пундик Сергій Іванович, к.т.н.

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом ректора університету від 7 02 2025 р. № 23

2. Строк подання студентом роботи на кафедру 2.06.25

3. Вихідні дані до роботи характеристики системи керування асинхронним двигуном

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ. 1 Огляд та аналіз технічної літератури з тематики бакалаврської роботи. 2. Розробка мікропроцесорної системи керування асинхронним двигуном. 3. Розрахунки мікропроцесорної системи керування асинхронним двигуном. Висновки. Перелік джерел посилань.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)

1. Схеми керування асинхронним двигуном (ДО, А1). 2. Асинхронний двигун (ВЗ, А1). 3. Асинхронний двигун (ВЗ, А1). 4. Система мікропроцесорного керування асинхронним двигуном (С2, А1). 5. Система мікропроцесорного керування асинхронним двигуном (ДІ, А1).

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1. Огляд та аналіз технічної літератури		
2. Розробка мікропроцесорної системи керування асинхронним двигуном		
3. Розрахунки мікропроцесорної системи керування асинхронним двигуном		
4. Оформлення пояснювальної записки та графічного матеріалу		

Студент

В. Якунін
Підпис

Керівник роботи

Підпис

В.М. Якунін

Ініціали, прізвище

С.І. Пундик

Ініціали, прізвище

АНОТАЦІЯ

до бакалаврської кваліфікаційної роботи студента спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

1. Прізвище, ім'я та по батькові Якунін Вадим Михайлович

2. Тема бакалаврської роботи Розробка мікропроцесорної системи керування асинхронним двигуном

3. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання опонента _____

4. Об'єм бакалаврської роботи: креслень 5 арк., сторінок записки 54

5. Одним з найважливіших векторів, у якому присутній технічний поступ, є створення сучасних енергоощадливих систем керування та вдосконалення наявних з точки зору енергоефективності промислових комплексів. Це надзвичайно нагально зараз, враховуючи безперервне здорожчання енергоносіїв. Для промислового устаткування критично важливим є показник надійності, що визначає роботу пристрою в складних умовах. Метою цього дипломного проєкту є створення мікропроцесорної системи для керування асинхронним трифазним двигуном головного руху токарного верстата. Завданням є досягнення показників, які будуть не гіршими, а в певних аспектах навіть кращими, ніж у аналогічних установок. В розрахунково-пояснювальній записці наведено всі необхідні розробки, а також розділи, що відповідають встановленим вимогам. В першому розділі проведено огляд та аналіз існуючих технічних та технологічних рішень з тематики бакалаврської роботи, а саме асинхронні двигуни, їх способи керування та принцип роботи. В другому здійснюється розробка мікропроцесорної системи керування асинхронним двигуном. В третьому розділі проведено розрахунки мікропроцесорної системи керування асинхронним двигуном.

Підпис студента В. Якунін

" 2 " 06 20 25 р.

РІШЕННЯ ЕК:

Протокол 1 від "12" 06 20 25 р.

Оцінка проєкту ЕК 4,0/5
Рекомендації ЕК -

Особливі відмітки -

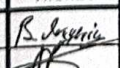


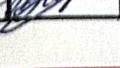
Технічний секретар С. С.

" 12 " 06 20 25 р.

ЗМІСТ

	стор.
Вступ.....	5
1 Огляд та аналіз технічної літератури з тематики бакалаврської роботи.....	6
1.1 Асинхронні двигуни	6
1.2 Способи керування асинхронним двигуном	13
1.3 Принцип роботи асинхронних двигунів.....	15
Висновки до першого розділу	17
2 Розробка мікропроцесорної системи керування асинхронним двигуном.....	18
2.1 Мікропроцесорна система керування	18
2.2 Розробка структурної схеми	24
Висновки до другого розділу	25
3 Розрахунки мікропроцесорної системи керування асинхронним двигуном.....	26
3.1 Математична модель керування асинхронним двигуном.....	26
3.2 Структурна схема системи керування, вибір структури і розрахунок параметрів регулятора.....	35
3.3 Розрахункова схема системи керування приводом в середовищі MATLAB Simulink	38
3.4 Розрахунки параметрів АД	42
Висновки до третього розділу	51
Висновки	52
Перелік джерел посилань	53

БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
					Розробка мікропроцесорної системи керування асинхронним двигуном		
Розроб.		Якунін В. М.			Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Пундик С. І.				4	54
Реценз.					ХНУ зр. ЕМ-21-1		
Н. Контр.		Тимошук О.					
Затверд.		Неймак В.					

ВСТУП

На сьогоднішній день чимало здобутків у науці і техніці пов'язані з розквітом електроніки. Складно уявити сферу, де б не знаходили застосування електронні прилади чи електронні пристрої вимірювальної техніки та автоматики.

Проектування електронних пристроїв для промисловості – це процес обробки відомостей, в ході якого, виходячи з вихідних даних та інших інформаційних джерел, необхідної для вирішення поставленої задачі, використовуючи конкретні методи та відповідний математичний апарат, розробляється технічна документація на пристрій, що оптимально відповідає сформованому технічному завданню.

Одним з найважливіших векторів, у якому присутній технічний поступ, є створення сучасних енергоощадливих систем керування та вдосконалення наявних з точки зору енергоефективності промислових комплексів. Це надзвичайно нагально зараз, враховуючи безперервне здорожчання енергоносіїв.

Для промислового устаткування критично важливим є показник надійності, що визначає роботу пристрою в складних умовах. Умови функціонування точного обчислювального обладнання на виробництві часто є вкрай несприятливими з огляду на фактори довкілля.

Метою цього дипломного проєкту є створення мікропроцесорної системи для керування асинхронним трифазним двигуном головного руху токарного верстата. Завданням є досягнення показників, які будуть не гіршими, а в певних аспектах навіть кращими, ніж у аналогічних установок.

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ З ТЕМАТИКИ БАКАЛАВРСЬКОЇ РОБОТИ

1.1 Асинхронні двигуни

На сьогоднішній день асинхронні двигуни складають щонайменше 80% з усієї кількості випущених промисловістю електродвигунів, визначальними є ці агрегати. Йдеться про трифазні асинхронні двигуни.

Трифазні асинхронні машини мають широке застосування в автоматичній та телемеханіці, у побутовій та медичній техніці, у пристроях звукозапису та інших.

Асинхронна машина – електричний двигун змінного струму, обертова швидкість якого відрізняється (в режимі роботи є меншою) від швидкості обертань магнітних полів, що виникає під дією струму обмотки статора.

В окремих державах колекторні машини теж зараховують до асинхронних машин. В Україні термін "асинхронні машини" закріпився за двигунами, що фактично є асинхронними.

Асинхронні машини – це серце сучасного електроприводу, їх частка найбільша серед усіх електричних машин. Найчастіше їх застосовують як електродвигуни, відіграючи ключову роль у перетворенні електричної енергії на механічну.

Переваги асинхронних машин.

Велике застосування трифазних асинхронних машин зумовлене тим, що вони:

- мають просту конструкцію;
- надійні в роботі;
- володіють хорошими експлуатаційними характеристиками;
- мають невисоку ціну;
- нескладні в обслуговуванні.

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Недоліки:

- невеликий момент на старті;
- велика сила струму в момент запуску.

Асинхронна машина складається зі статора і ротора (рис. 1.1) та між ними є повітряний зазор. Основними активними складовими є обмотки та магнітопровід; інші елементи виконують конструктивну функцію, забезпечуючи необхідну міць, жорсткості, охолодження, можливості обертань тощо.



Рисунок 1.1 – Будова асинхронної машини змінного струму

Обмотка статора представлена трифазною (або багатофазною) обмоткою, чії провідники симетрично розподілено по статору і вкладені пофазно у пази, розташовані під кутом 120 електричних градусів. Фази обмотки статора з'єднують згідно з ustalеними схемами: "трикутник" або "зірка", після чого їх приєднують до трифазної мережі. Магнітопровід статора змінює свій магнітний стан у відповідь на коливання (рух)

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

магнітного потоку обмотки збудження. З цих причини його виробляють з ламінованої електротехнічної сталі, що дозволяє мінімізувати втрати на магнітострикцію та вихрові струми.

За конструкцією ротора асинхронні машини поділяються на два основних типи: з короткозамкненими роторами і з фазними роторами. Обидва різновиди використовують аналогічну конструкцію статора, а різниця полягає виключно в устрої обмотки ротора. Магнітний сердечник ротора виконаний аналогічно магнітопроводу статора - виконаний з електротехнічних сталей і заряджений.

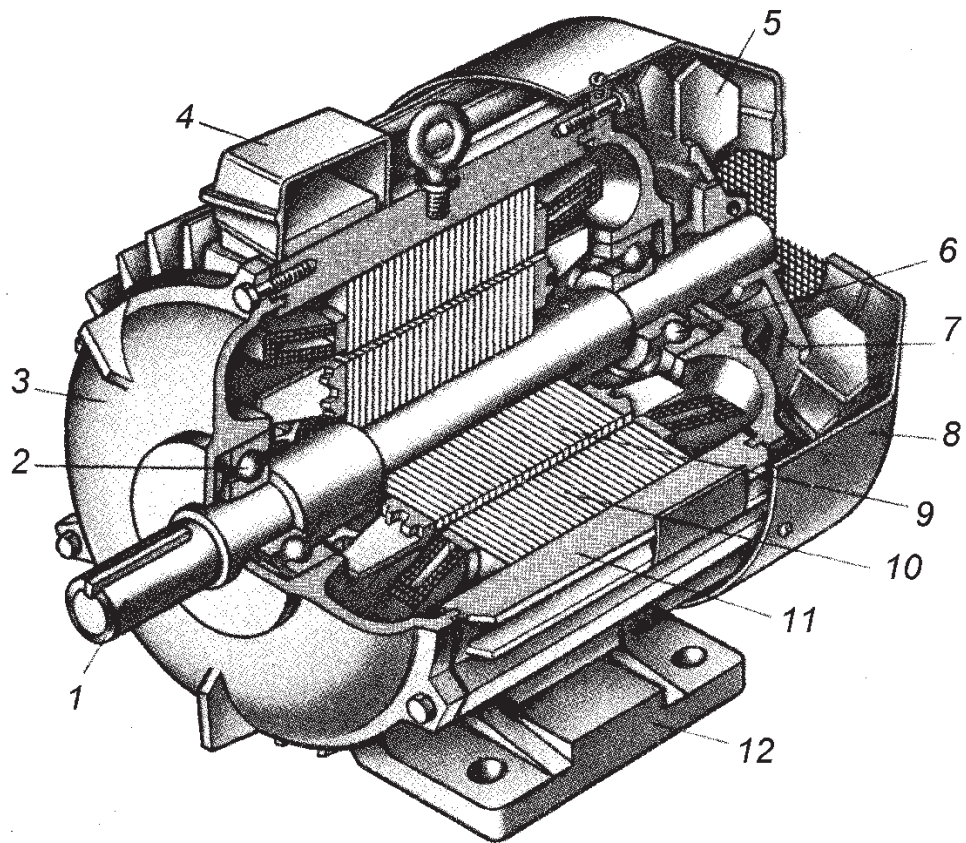
1.1.1 Короткозамкнений ротор (рис. 1.2)

Обмотка короткозамкненого ротора (рис. 1.3), яку часто називають "білячою кліткою", з огляду на зовнішню схожість, складається з мідяних або алюмінієвих стержнів, замкнених на кінцях двома кільцями. Стержні цієї обмотки поміщаються в пази серцевини ротора.

У малогабаритних та середніх двигунах ротор найчастіше виготовляється способом заливання розтопленого алюмінієвого сплаву в пази осердя ротора. Разом із стрижнями "білячої клітки" виливають короткозамкнені кільця і кінцеві лопаті. Це забезпечує самовентиляцію ротора та загальну вентиляцію всієї машини.

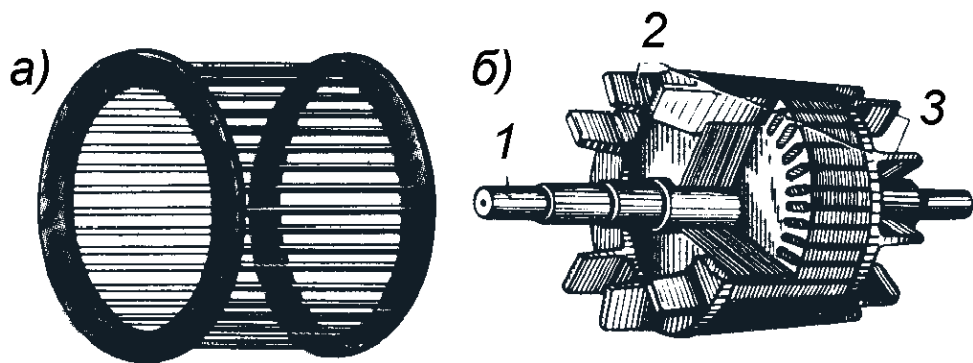
В потужних машинах "біляча клітка" виконана з мідних прутків, кінці яких з'єднані зварюванням в короткозамкнені кільця.

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



1 - вал; 2, 6 - підшипники; 3, 7 - підшипникові щити; 4 - коробка виводів;
 5 - вентилятор; 8 - кожух вентилятора; 9 - осердя ротора з короткозамкненою обмоткою; 10 - осердя статора з обмоткою; 11 - корпус; 12 - кріплення

Рисунок 1.2 – Будова трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором:



1 - вал; 2 - короткозамкнені кільця; 3 - вентиляційні лопатки

Рисунок 1.3 – Короткозамкнений ротор: а - обмотка «клітка білки»; б - ротор з обмоткою, виконаної методом лиття під тиском

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.

9

1.1.2 Фазний ротор

Головними складниками будь-якої асинхронної машини це нерухома частина – статор, та обертова складова, що зветься ротором.

Статор трифазної асинхронної машини утворений із намагніченого магнітного осердя, яке запресоване у литу рамку. На внутрішній частині осердя розташовані пази, які призначені для укладки провідників обмоток. Ці провідники формують собою сторони багатовиткових м'яких котушок, які, в свою чергу, створюють три фази обмотки статора. Геометрично вісі котушок просторово розсунуто щодо одне одної на кут у 120 градусів.

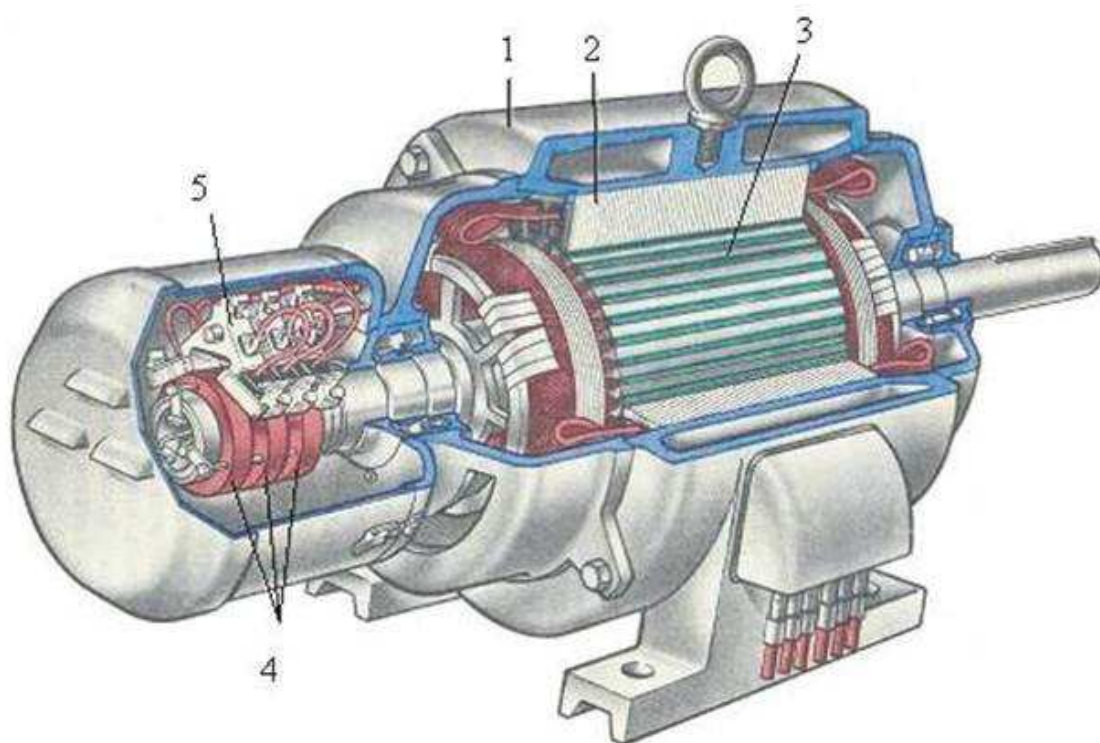
Фази обмоток можливо з'єднувати як «зірка», так і «трикутник», все залежить від напруги, яку видає мережа. Для прикладу, якщо у технічному паспорті електродвигуна вказані напруги 220~380 В, то під час напруги мережі 380 В, фази з'єднані «зіркою». У ситуації, коли мережева напруга дорівнює 220 В, обмотки з'єднують «трикутником». Незалежно від способу з'єднання, фазна напруга машини дорівнює 230 В.

Ротор трифазного асинхронного двигуна має форму циліндра, виготовленого зі штампованих листів електротехнічної сталі, та закріплений на валу. В залежності від типу обмотки, ротори трифазних асинхронних двигунів розрізняють на короткозамкнені та фазні.

На рисунку 1.4 показаний вигляд поперечного перерізу асинхронного двигуна з фазним ротором.

Зазвичай паз ротора або статора розташовують під кутом, аби зменшити небажану вищу гармонійну ЕРС. Її спричиняють пульсації магнітного потоку через зубців, чий магнітний опір значно менший за опір обмотки. Такий підхід також допомагає знизити рівень шуму, породженого магнітними явищами.

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



1 - станина; 2 - обмотка статора; 3 - ротор; 4 – контактні кільця;
5 - щітковий механізм

Рисунок 1.4 – Асинхронний двигун з фазним ротором:

Для оптимізації пускових властивостей короткозамкнених асинхронних двигунів, зокрема для нарощування пускового моменту та зменшення стартового струму, роторні пази виконуються особливої форми. Зовнішня частина пазу ротора, зміщена від осі обертання, вужча за внутрішню. Цей прийом використовує ефект витіснення струму, що призводить до збільшення активного опору обмотки ротора при значних ковзаннях, зокрема в момент запуску.

Асинхронні машини з короткозамкненими роторами характеризуються невисоким пусковим моментом та високим пусковим струмом, що є суттєвим недоліком "клітки". Через це їх застосовують там, де великі пускові струми не критичні. З позитивних сторін варто виділити простоту виробництва, а також відсутність механічних контактів з нерухомою частиною двигуна, що

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

забезпечує довговічність і зменшує витрати на сервіс. За спеціальною конструкцією ротора, як магнітопроводи "ротора" нерухомі, а в зазорі обертається тільки порожнистий алюмінієвий циліндр (біляча клітка або обмотка "біляча клітка"), можна досягти низької інерційності двигуна.

У фазному роторі трифазне обмотування, аналогічне до обмотки статора, з тією ж кількістю полюсних пар. Витки обмотки розташовуються в пазах осердя ротора і з'єднуються зіркою. Кінці кожної фази підключено до контактних кілець, що закріплені на валу ротора, і через щітки виводяться у зовнішній ланцюг. Контактні кільця виготовляються з латуні чи сталі, мусять бути ізольовані одне від одного та від вала. Щітки виготовляються з металографіту, їх притискають до контактних кілець за допомогою пружин щіткотримача, який нерухомо закріплено в корпусі машини. На рисунку 1.5 показано умовне позначення асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором (а) та фазним (б).

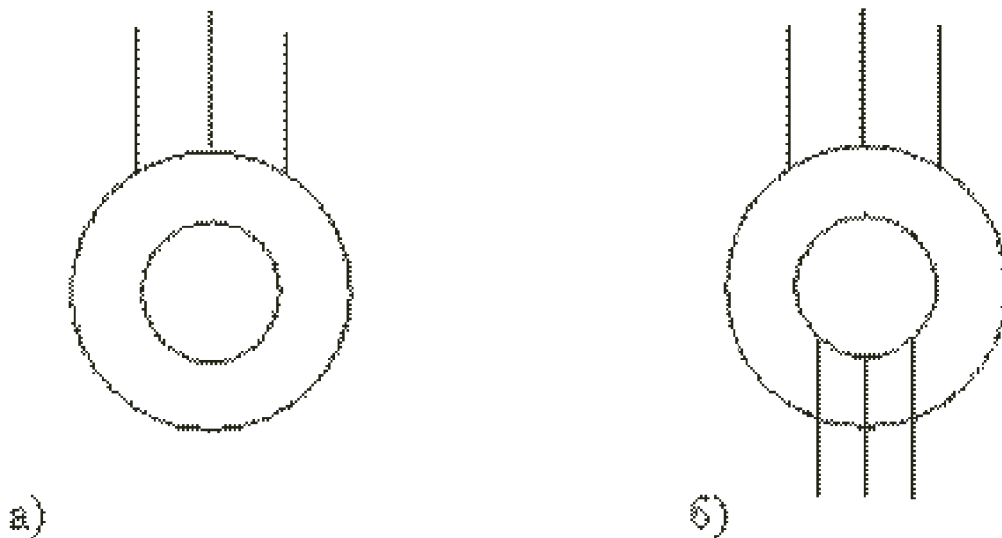


Рисунок 1.5 – Умовне позначення асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором (а) і фазною (б)

В асинхронних електродвигунах значної потужності та у специфічних малопотужних машинах фазні ротори застосовуються для покращення пускових та регульовальних характеристик. В таких випадках задіюється

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

трифазна обмотка з геометричними осями фазних котушок (1) (рис. 1.6), що просторово зміщені одна відносно одної на 120 градусів.

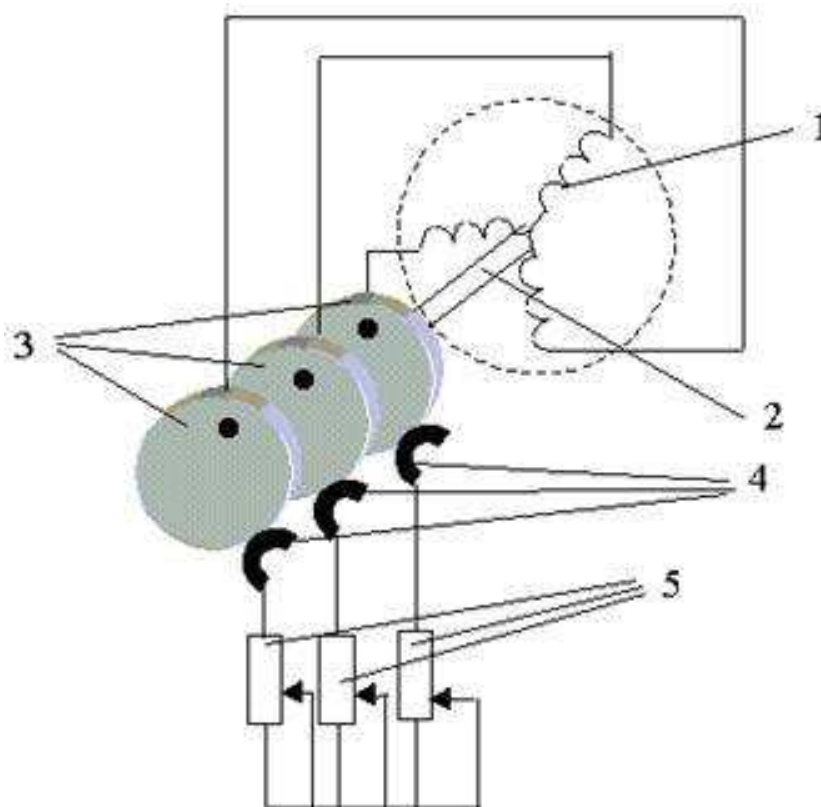


Рисунок 1.6 – Фазний ротор

Фази обмоток сполучені зіркою, а їхні кінці під'єднані до трьох контактних кілець (3), закріплених на валу (2) та електрично ізольованих як від валу, так і між собою. Через щітки (4), що ковзають по кільцях (3), можна приєднувати керуючі реостати (5) до ланцюгів фазних обмоток.

Асинхронний двигун з фазними роторами демонструють кращі пускові характеристики та потенціал керування. Водночас, йому властиві більші габарити, маса та вища ціна, у порівнянні з асинхронним двигуном з короткозамкненим ротором.

1.2 Способи керування асинхронним двигуном

Управління асинхронною машиною змінного струму передбачає

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

регулювання швидкості обертання та/або крутного моменту ротора.

Існують слідуєчі способи управління асинхронним двигуном:

а) реостат – регулювання обертів машини з фазними роторами шляхом коригування опорів реостата в колі роторів; це також сприяє збільшенню пускового моменту;

б) частота – варіювання швидкості обертання машини завдяки зміни частот струмів живлення, що призводить до змін швидкостей обертання магнітних полів статора.

Запуск двигуна реалізується через ЧП:

а) переключення обмоток з схеми «зірка» на схемим «трикутник» під час старту двигуна. Це зменшує пускові струми в обмотці приблизно вдвічі, але супроводжується зниженням обертального моменту.

б) імпульсні методи – шляхом подачі специфічного типу напруги живлення (наприклад, пилоподібної).

в) додавання додаткового електричного впливу від джерела з позначенням "С" узгоджується з частотою ковзання у вторинному контурі або ж має протилежне спрямування.

г) варіювання кількості полюсних пар, за умови конструктивної передбаченості такого перемикавання (актуально лише для роторних кіл).

д) корекція амплітуд напруг живлення, що полягає виключно у зміні амплітуди (чи ефективного показника) управляючої напруги. При цьому вектори керуючої та збуджувальної напруги зберігають перпендикулярне розташування (як, наприклад, під час запуску автотрансформатора).

е) регулювання фаз визначається тим, що коригування частот обертання ротора відбувається через коригування зміщення фаз між вектором напруг збудження та управління;

ж) амплітудно-фазовий метод об'єднує обидва згадані способи;

з) під'єднання до ланцюга живлення статора реактора;

і) індуктивний опір машини з фазним ротором.

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Управління реостатом.

У трифазних асинхронних машинах із фазними роторами застосовують реостатний метод зміни частоти обертання ротора. Це реалізується шляхом включення трифазного реостата, який піддається регулюванню, у ланцюг фазної обмотки ротора, аналогічно до того, як відбувається пуск двигуна. Проте цей реостат необхідно проектувати на тривалі навантаження струмами ротора, а не на короткочасні, як це передбачено для пускового реостата.

Якщо за сталого крутного моменту на валу машини активний опір кола ротора зростає через поступове зростання опорів реостатів ($r_{p1} < r_{p2} < r_{p3}$), робоча точка переміщатиметься від однієї кривої $M_{вр}(s)$ до іншої, яка відповідає збільшеному опору в колі ротора, що, у свою чергу, збільшує ковзання, а значить, і зменшує швидкість обертання двигуна. Отже, з цією метою можливо коригувати швидкість обертання ротора, варіюючи від встановленої до повної зупинки. Негативною рисою цього методу контролю є істотні втрати енергії.

1.3 Принцип роботи асинхронних двигунів

Принцип дії асинхронної машини базується на використанні обертового магнітного поля. Коли трифазну обмотку статора підключають до мережі, виникає обертове магнітне поле, кутова швидкість якого залежить від частоти мережі f та кількості пар полюсів обмотки p , що визначається формулою:

$$\omega_1 = \frac{2\pi f}{p}, \quad (1.1)$$

де ω_1 - кутова частота, рад/с;

f - частоти, Гц;

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

p - величина намотування.

Перетинаючи провідники обмоток статора та ротора, те поле породжує у них ЕРС (згідно із законом електромагнітної індукції). Коли обмотка ротора замкнена, його ЕРС спричиняє виникнення струму в колі ротора. Внаслідок взаємодії струму з утвореним магнітним полем формується електромагнітний момент. Якщо цей момент перевищує момент протидії на валу машини, вал починає обертатись, змушуючи рухатись робочий механізм магнітне поле, яке називається синхронним. Звідси й назва двигуна асинхронний, або ж несинхронний.

Для функціонування асинхронного двигуна властиве ковзання S , яке визначається як відносна різниця кутових швидкостей магнітного поля та ротора:

$$S = \frac{(\omega_1 - \omega_2)}{\omega_1}, \quad (1.2)$$

де S – ковзання.

Наприклад, в ідеалі при роботі на холостому ході ротор та магнітне поле обертаються з ідентичною частотою в одному напрямку, ковзання $S = 0$, ротор є нерухомим відносно обертового магнітного поля, ЕРС у його обмотці не виникає, струм ротора та електромагнітний момент машини рівні нулю. Режим стаціонару: $\omega_2=0$, $S=1$. У загальному випадку ковзання під час роботи двигуна змінюється від $S = 1$ при запуску до $S = 0$ в ідеальному режимі холостого ходу.

При обертанні ротора швидше за магнітне поле, тобто у тому ж напрямку, ковзання стає від'ємним. У такому разі машина працює як генератор, генеруючи гальмівний момент. Коли ротор обертається в протилежний бік від поля ($\omega_2 > \omega_1$ ($s > 1$)), асинхронний двигун переходить в режим протиувімкнення, також створюючи гальмівний момент. Отже, в залежності від ковзання, розрізняють: режим двигуна ($s = 1 \div 0$), режим

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

генератора ($s=0 \div -\infty$) та режим протиувімкнення ($s=1 \div +\infty$). Генераторний та режим протиувімкнення використовують для гальмування асинхронних двигунів.

Висновки до першого розділу

Проведено огляд асинхронних двигунів з короткозамкненим та фазним ротором. Представлено інформацію про способи керування асинхронним двигуном, а саме реостатний та частотний методи. Розглянуто принцип дії асинхронної машини на використанні обертових магнітних полів.

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 РОЗРОБКА МІКРОПРОЦЕСОРНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ АСИНХРОННИМ ДВИГУНОМ

2.1 Мікропроцесорна система керування

Комп'ютери стали частиною нашого життя ще з 50-х років минулого століття. Спочатку вони були гігантськими машинами, вартість яких сягала захмарних висот, тож їх могли собі дозволити лише державні органи влади та великі підприємства. З появою мікропроцесорів комп'ютери зазнали кардинальних змін як у розмірах, так і у формі, перетворившись до невпізнаваності.

Мікроконтролер (MCU) - це інтегральна схема, яка розроблена для керування електронними приладами. Стандартний мікроконтролер об'єднує в собі функції процесора та периферійних пристроїв, і може включати оперативну пам'ять та ПЗП, що дозволяє йому виконувати прості операції. Застосування однієї мікросхеми замість кількох, як це буває зі звичайними процесорами, котрі використовуються в персональних комп'ютерах, істотно зменшує розміри, споживання енергії та вартість пристроїв, створених на основі мікроконтролерів.

Мікропроцесор (МП) - це керований програмно електронний цифровий пристрій, що призначений для опрацювання цифрової інформації та керування процесом цього опрацювання. Виготовлений на одній або кількох інтегральних схемах з високим рівнем інтеграції електронних елементів.

Мікроконтролери є фундаментом для створення вбудованих систем, вони присутні у багатьох сучасних приладах, на кшталт телефонів, пральних машин та інших.

Мікроконтролери - це багатофункціональні пристрої, які здебільшого інтегровані в складі складніших систем, таких як контролери. Внутрішня шина даних мікроконтролера прихована від користувача в середині

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

мікросхеми. Підключення зовнішніх компонентів до мікроконтролера обмежене. Пристрої на базі мікроконтролерів переважно розроблені для вирішення конкретної задачі.

Мікропроцесорну систему можна розглядати як специфічний різновид електронної системи, що розроблена для опрацювання вхідних і вихідних сигналів (див. рис. 2.1). Як вхідні та вихідні сигнали можна використовувати аналогові сигнали, окремі цифрові сигнали, цифрові коди або послідовності цифрових кодів. Оскільки мікропроцесорні системи є цифровими, аналогові вхідні сигнали перетворюються на послідовності дискретизованих кодів через АЦП, а вихідні аналогові сигнали генеруються з послідовностей дискретизованих кодів за допомогою ЦАП. Інформація обробляється та зберігається в цифровому форматі.

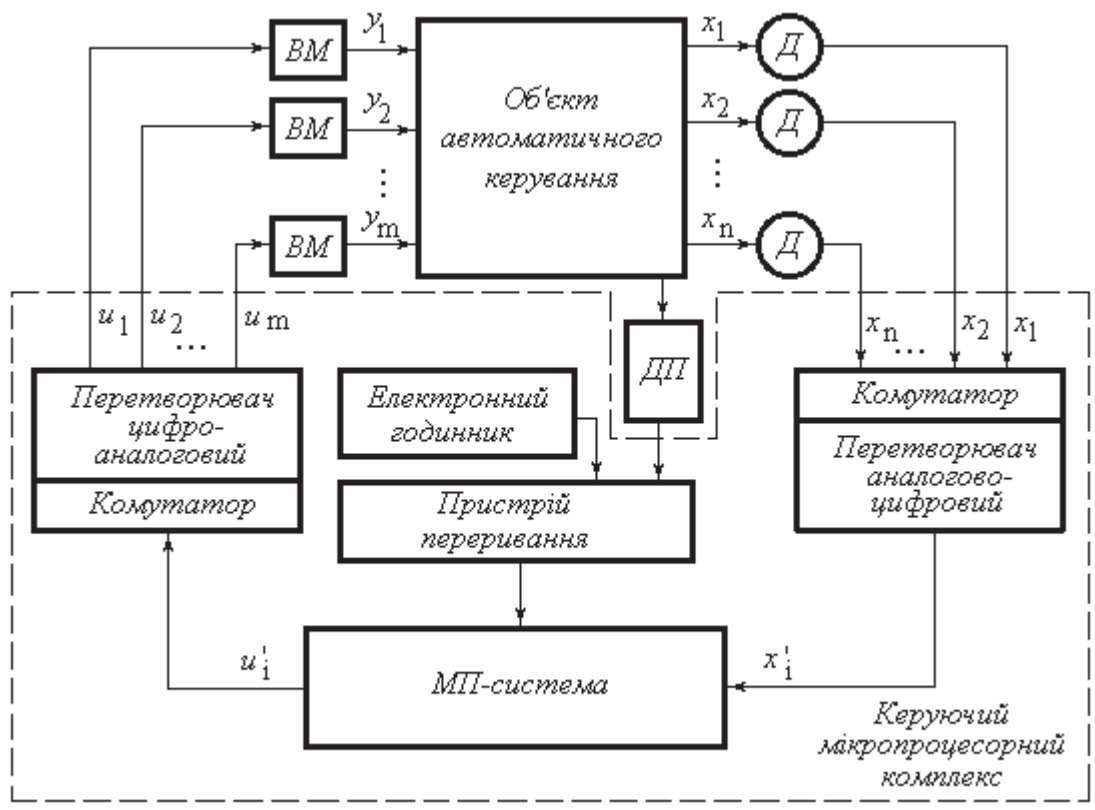


Рисунок 2.1 – Мікропроцесорна система керування

Шина - це група ліній передачі інформації, об'єднаних загальною

функціональною ознакою. У мікропроцесорній схемі використовуються три типи шин: передача даних, адреси і управління.

Розрядність внутрішньої шини даних, т. Е. Число числових бітів, що передаються одночасно (паралельно) по ній, відповідає розрядності використовуваних МП слів. Очевидно, що розрядність внутрішньої і зовнішньої шин передачі даних повинна бути однаковою. У восьмирозрядному МП внутрішня шина даних складається з восьми ліній, по яких можуть послідовно передаватися восьмирозрядні слова – байти. Зауважимо, що шина даних передає лише слова, оброблені ALU, а й інформацію про команди. Тому недостатньо велика розрядність шини даних може обмежувати склад (складність) інструкцій і їх кількість. Тому розрядність шини даних є однією з важливих характеристик мікропроцесора – вона багато в чому визначає його структуру (номери біт вказані на малюнку в дужках поруч з назвами блоків).

Шина даних МТ двонаправлена, що означає, що слова можуть передаватися в обох напрямках, але не одночасно. У цьому випадку потрібне використання спеціальних буферних схем і мультиплексний режим обміну даними між МП і зовнішньою пам'яттю. Режим мультиплексу, званий іноді багатоточковим, являє собою режим одночасного використання каналу передачі великою кількістю абонентів з поділом в часі контролю обміну.

Мультиплексор - це пристрій, який вибирає дані з одного, двох (або більше) вхідних інформаційних каналів і подає ці дані на свій вихід. Схема мультиплексора складається з двох входових логічних елементів AND-OR, керованих розподільником імпульсів. У промисловості випускаються мультиплексори, які можуть входити до складу, а також у вигляді окремих LSI (наприклад, восьмивходові однорозрядні; двовходові чотирирозрядні; трьохходові чотирирозрядні і т.д.).

Демультиплексор - це пристрій, що виконує протилежну функцію мультиплексора, який подає дані, що надходять на його вхід, на один (або

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

декілька) вихідний інформаційний канал.

Мультиплексори і демультимплексори дозволяють скласти мікрокомп'ютери з елементів мікропроцесора на будь-яку довжину машинного слова. Припустимо, що завдання обробки даних полягає в додаванні двох операндів, кожен з яких є восьмирозрядним двійковим числом – байтом.

Восьмизначний арифметико-логічний пристрій використовує всі арифметично та логічно дії. На перший вхід АЛУ надходить байт від восьмирозрядної батареї, а на другий вхід надходить байт з восьмирозрядного проміжного регістра. Результат додавання цих двох байт передається з виходу АЛУ через внутрішні шини даних на батарею. Така організація задовольняє одноадресної організації мікропроцесора. Він визначається тим, що один з операндів, який бере участь у обробці, незмінно зберігається в акумуляторі, адреса якого встановлена за замовчуванням. Отже, під час додавання двох операндів, достатньо вказати лише одну адресу. Другий операнд, для прикладу, може зберігатись в одному з восьми регістрів загального призначення (РЗП). АЛУ підключений до регістру ознак, призначеного для зберігань та аналізів характеристик результату операції, та схемою десяткової корекції (на рис. 2 не показана), що дозволяє обробляти дані у двійково-десятковому коді.

Мікропроцесор також включає в себе покажчик стека, лічильник команд, регістр адресного буфера, оперативну пам'ять. Перші два регістри процесора – W та Z – використовуються для тимчасового збереження інформації під час обробки команди (до них програміст доступу не має). Решта шість RON: B, C, D, E, H та L, виконують роль осередків внутрішньої пам'яті, відомої як оперативний запам'ятовуючий пристрій (ОЗП). У цих регістрах зберігаються операнди, необхідні для обчислень в арифметико-логічному пристрої (АЛП), результати операцій, виконаних в АЛП, а також контрольні слова. Кожен з регістрів може вмістити інформацію об'ємом в

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

один байт. Звернення до РОН є чітко визначеним. Згруповане розміщення регістрів В і С, D і E, H і L дає змогу працювати з двобайтовими словами, що відоме як обробка з "подвійною точністю". Обмін інформацією з РОН (отримання та збереження даних) відбувається через мультиплексор, а потрібний регістр обирається за допомогою селектора регістрів за сигналом УУ.

У лівій половині малюнку 2 показані регістр команд, дешифратор коду операції та блок управління (БУ). Дешифратор, хоч і є частиною БУ, зображений окремо для кращого візуального сприйняття. На малюнку регістр адрес стека відсутній, тому що стек є певною зоною оперативної пам'яті.

Обмін відомостями між регістрами та іншими частинами мікропроцесора відбувається за посередництвом внутрішньої шини даних. Водночас, передача інструкцій та даних розмежована в часі. З'єднання із зовнішньою магістраллю даних відбувається за допомогою буферного регістру даних.

Мікропроцесори - пристрої з програмним управлінням. Порядок опрацювань даних визначається програмами, т. Е. Набором інструкцій. Команда поділяється з двох частин: код операції та адресу. Код операції містить інформацію про те, яку операцію слід виконати над оброблюваними даними. Адреса вказує, де знаходяться ці дані (в регістрах загального призначення мікропроцесора, т. Е. У внутрішній або зовнішній пам'яті). Слово даних, яке потрібно обробити, становить один байт. Команда здатна мати довжину в один, два або три байти, котрі розміщуються в пам'яті в лінійній послідовності.

Перший байт команди містить код операції. Зчитування на початку інтервалу виконання інструкції, званого циклом команд, перший байт інструкції йде через внутрішню шину даних до регістру команд, де зберігається протягом усього циклу. Дешифратор коду операції розшифровує вміст регістра команд — він визначає характер операції та адреси операндів.

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ця інформація подається в систему управління, яка формує керуючі сигнали, які надходять на мікропроцесорні блоки, що беруть участь у виконанні даної інструкції.

У разі, коли код операції безпосередньо вказує адресу оброблюваного об'єкта даних, операція починається відразу після зчитування першого байта інструкції. Якщо інструкція містить більше одного байта, то залишилися байти, що несуть інформацію про адресу ділянки пам'яті, де зберігаються дані, передаються або в регістр адресного буфера, або в один з RОН тільки після завершення всієї процедури зчитування інструкцій, або, іншими словами, після отримання повної інформації про розташування операндів і про те, яку операцію слід виконати, операція починається.

Розглянемо приклад виконання операції додавання двома операндами. Перший з яких зберігає в акумуляторі, а другий - в одному з RОН (його адреса вказується в інструкції), звідки передається в проміжний регістр. За кодом операції АЛУ підсумовує отримані на його вході байти і видає результат, який записується в батарею. Цей результат міг бути використано на подальших етапах обробки.

Поряд з багатокристалльними і однокристалльними МП використовуються секційні або розрядно-модульні МП. Їх головна відмінна риса полягає в тому, що кожен модуль призначений для обробки декількох бітів машинного слова, а слово в цілому обробляється групою модулів або розділів, з'єднаних один з одним.

Для регулювання частоти обертання асинхронного двигуна буде використовуватися мікропроцесор AtMega128 (8-бітний AVR – це мікроконтролер з можливістю програмування флеш-пам'яті об'ємом 128 кБ). Мікроконтролер AtMega128 володіє рядом визначних особливостей.

Мікроконтролер AtMega128 інтегрується з необхідними електричними колами та сенсорами, забезпечуючи можливість налаштування частоти обертання асинхронного двигуна наступним чином:

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

1. Асинхронний двигун білячої клітки за допомогою:
 - а) регулювання частоти зміни частоти;
 - б) перемикання числа пар полюсів;
 - в) зміна значення напруги живлення.
2. Фазний ротор асинхронного двигуна за допомогою:
 - а) введення додаткового опору в ланцюг ротора;
 - б) каскад асинхронних затворів;
 - в) двигун подвійної потужності.

2.2 Розробка структурної схеми

Метод управління зміною величини напруги живлення може бути використаний як для двигуна з короткозамкненим ротором, так і для асинхронного двигуна з фазним ротором.

Перевагами даної системи є використання даної системи як для двигунів з короткозамкненим ротором, так і для асинхронних двигунів з фазним ротором; використання декількох способів регулювання швидкості руху, що дозволяє змінювати параметри ефективності, енергозабезпечення і багато інших характеристик, які можуть вплинути на якість продукту.

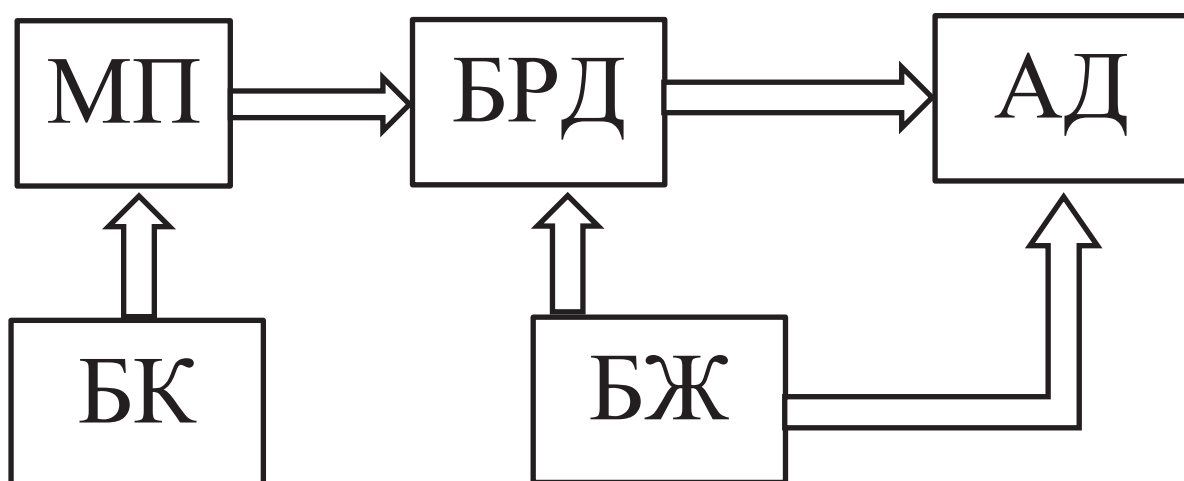


Рисунок 2.2 – Структурна схема системи регулювання швидкості асинхронного двигуна

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

МП – мікропроцесор;
БК – блок керування;
БЖ – блок живлення;
БРД – блок регулювання двигуном;
АД – асинхронний двигун.

Висновки до другого розділу

Було розроблено мікропроцесорну систему керування асинхронним двигуном.

Так як пристрій побудовано на високоінтегрованій мікропроцесорній базі, то були досягнуті хороші вагові, габаритні і функціональні показники.

Проведено аналіз структур систем управління, методів їх впровадження, за результатами якого було зроблено вибір, заснований на міркуваннях мінімальних витрат, зручності впровадження, наявності елементної бази.

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 РОЗРАХУНКИ МІКРОПРОЦЕСОРНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ АСИНХРОННИМ ДВИГУНОМ

3.1 Математична модель керування асинхронним двигуном

$$M_{\text{дв}} = I_{\text{пр}} \frac{d\omega}{dt} + \alpha\omega + M_{\text{Н}} \quad (3.1)$$

де $M_{\text{дв}}$ - крутний момент, що подається на двигун, Н·м; $I_{\text{пр}}$ - зменшений момент інерції на вал електродвигуна всіх мас, що обертаються частин, Н·м; ω - кутова швидкість, рад/с; α - коефіцієнт в'язкого тертя; $M_{\text{Н}}$ - момент навантаження, Н·м.

$$\frac{I_{\text{пр}}}{\alpha} \cdot \frac{d\omega}{dt} + \omega = (M_{\text{дв}} - M_{\text{Н}}) \frac{1}{\alpha}, \quad (3.2)$$

$$T_{\text{мех}} = \frac{I_{\text{пр}}}{\alpha}, \quad (3.3)$$

$$K_{\text{эд}} = \frac{1}{\alpha}, \quad (3.4)$$

$$T_{\text{мех}} \frac{d\omega}{dt} + \omega = K_{\text{эд}}(M_{\text{дв}} - M_{\text{Н}}), \quad (3.5)$$

при $t = 0$; $\omega = 0$.

Розв'язок рівняння:

$$\omega = K_{\text{эд}}(M_{\text{дв}} - M_{\text{Н}}) \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T_{\text{мех}}}}). \quad (3.6)$$

Перехідний час:

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$t_n \approx 3T_{\text{мех}}$$

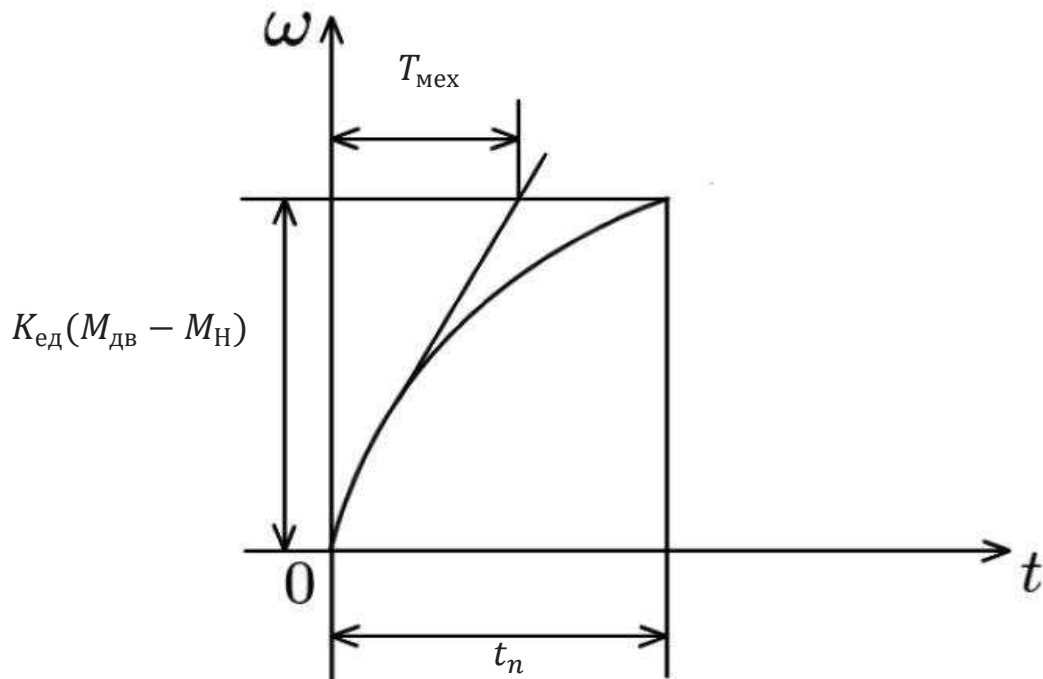


Рисунок 3.1 – Графік співвідношення кутових швидкостей до часу

3.1.2 Розрахунок сил і моментів

Робота над подоланням сил тертя ковзання при пересуванні супорта по направляючих:

$$F_{\text{тр}} = mg\mu = 1650 \cdot 9,8 \cdot 0,25 = 4045,4 \text{ Н} \quad (3.7)$$

Найбільше зусилля на санчатах при усталеному русі під час різання:

$$F_c = F_{\text{max}} + F_{\text{тр}} = 3400 + 4045,4 = 7445,5 \quad (3.8)$$

Найбільша кутова швидкість обертання ходового гвинта під час процесу різання:

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\omega'_{p.max} = \frac{2\pi\vartheta_{p.max}}{s} \quad \omega'_{p.max} = 12,56 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \quad (3.9)$$

Найбільша кутова швидкість ходового гвинта під час зворотного руху супорта:

$$\omega'_{o.max} = \frac{2\pi\vartheta_{o.max}}{s} \quad \omega'_{o.max} = 25,13 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \quad (3.10)$$

Момент пасивного навантаження на гвинт, що рухає, під час різання, враховуючи запас міцності $K_{зап} = 1,3$:

$$M'_{с.рез.} = \frac{K_{зап} F_c \vartheta_{p.max}}{\omega'_{p.max} \eta_{ШВП}} = 7,7 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (3.11)$$

Момент пасивного навантаження на ходовому гвинті при русі супорта назад визначається параметром $K_{зап}$:

$$M'_{с.о.} = \frac{K_{зап} F_{Тр} \vartheta_{o.max}}{\omega'_{o.max} \eta_{ШВП}} = 4,185 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (3.12)$$

Потужність, потрібна для приводу супорта на граничній швидкості під час різання:

$$P_{max} = M'_{с.рез.} \omega'_{p.max} = 96,79 \text{ Вт} \quad (3.13)$$

Час розгону і рівний час гальмування (без врахування періоду зрізу):

$$t_{рзг} = \frac{\vartheta_{o.max}}{a_{max}} = 3,2 \text{ с} \quad (3.14)$$

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Кутове прискорення, що досягається ходовим гвинтом, у піковому значенні:

$$\left(\frac{d\omega'}{dt}\right)_{max.рез} = \left(\frac{d\omega'}{dt}\right)_{max.о.х.} = \frac{a_{max}\omega'_{p.max}}{\vartheta_{p.max}} = 7,85 \text{ с} \quad (3.15)$$

Час функціонування приводу на сталій швидкості під час процесу різання:

$$t_{рез} = \frac{l}{\vartheta_{p.max}} = 250 \text{ с} \quad (3.16)$$

Час функціонування приводу при сталій швидкості під час руху назад:

$$t_{о.х.} = \frac{l}{\vartheta_{о.х.}} = 125 \text{ с} \quad (3.17)$$

Інерційність супорта впливає на ходовий гвинт (вихідний вал коробки передач КПП):

$$J_{о.х.} = J_{рез} = m \left(\frac{\vartheta_{p.max}}{\omega'_{p.max}}\right)^2 = 6,68 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (3.18)$$

Обертальний момент приводу ходового гвинта, залежно від режиму роботи:

$$M'_{д.рез} = J_{рез} \left(\frac{d\omega'}{dt}\right)_{max.рез} + M'_{с.рез} = 7,705 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (3.19)$$

$$M'_{д.о} = J_{рез} \left(\frac{d\omega'}{dt}\right)_{max.рез} + M'_{с.о} = 4,19 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (3.20)$$

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.1.3 Діаграми навантажень і швидкостей

$$M_1 = J_{\text{рез}} \left(\frac{d\omega'}{dt} \right)_{\text{max.рез}} + M'_{\text{с.без.рез.}} = 0,005 \text{ Н} \cdot \text{м} + 4,185 \text{ Н} \cdot \text{м} = 4,189 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$M_2 = M'_{\text{с.без.рез.}} = 4,185 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (3.21)$$

$$M_3 = M'_{\text{с.рез.}} = 7,7 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (3.22)$$

$$M_4 = M'_{\text{с.без.рез.}} - J_{\text{рез}} \left(\frac{d\omega'}{dt} \right)_{\text{max.рез}} = 4,185 \text{ Н} \cdot \text{м} - 0,005 \text{ Н} \cdot \text{м} = 4,180 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$M_5 = -M'_{\text{с.о.}} - J_{\text{рез}} \left(\frac{d\omega'}{dt} \right)_{\text{max.рез}} = -4,185 \text{ Н} \cdot \text{м} - 0,005 \text{ Н} \cdot \text{м} = -4,190 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$M_6 = -M'_{\text{с.о.}} = -4,185 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (3.23)$$

$$M_7 = -M'_{\text{с.о.}} + J_{\text{рез}} \left(\frac{d\omega'}{dt} \right)_{\text{max.рез}} = -4,185 \text{ Н} \cdot \text{м} + 0,005 \text{ Н} = -4,180 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$T_1 = 1,6 \text{ с};$$

$T_2 =$ не береться до уваги через дуже мале значення;

$$T_3 = 250 \text{ с};$$

$$T_4 = 1,6 \text{ с};$$

$$T_5 = 3,2 \text{ с};$$

$$T_6 = 125 \text{ с};$$

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$T7=3,2$ с;

Цикл = 394,2 с.

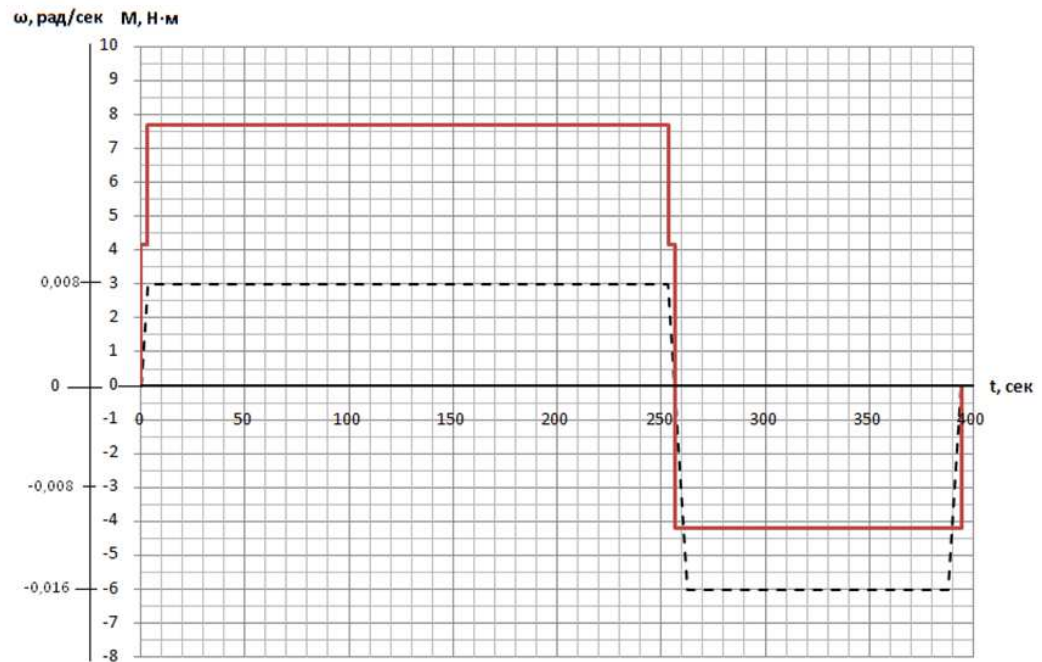


Рисунок 3.2 – Діаграми навантажень і швидкостей

3.1.4 Вибір мотор-редуктора

$$P = \omega'_{o.max} M'_{д,рез} = 193,6 \text{ Вт} \quad (3.24)$$

$$n_{max} = \omega'_{o.max} \frac{60}{2\pi} = 240 \frac{\text{об}}{\text{мин}} \quad (3.25)$$

$$M_{max} = 7,7 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (3.26)$$

Таблиця 3.1

Параметри двигуна DFR63M4

P_N M_N [кВт] [Нм]	n_N [об/мин]	I_N 380-415 В (400 В) [А]	$\cos\phi$	$EFF2$	$\eta_{75\%}$ $\eta_{100\%}$ [%]	I_A/I_N	M_A/M_N M_H/M_N	J_{Mot}		Z_0 BG ³ BGE ⁴ [вкл/ч]	M_{Bmax} [Нм]	m	
								1	2			1	2
0,18 1,3	1320	0,55 (0,55)	0,78	-	-	2,9	1,8 1,7	3,6	4,8	10000 -	3,2	6,1	7,6

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.

31

Співвідношення:

Співвідношення:

$$i = \frac{1320}{240} = 5,5$$

$$\frac{M_{max}}{i} < 1,3 \cdot 1,8 - \text{перевірка максимального крутного моменту.}$$

$$J_{дв} = 3,6 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

$$P_{дв} = 0,18 \text{ кВт}$$

Для двигуна було обрано мотор-редуктор R 07.

$$i_{ред} = 5,76$$

Момент інерції КПП не братиметься до уваги під час розрахунків. Це пов'язано з тим, що його величина є меншою за 5% від моменту інерції двигуна.

Далі, для моделювання в середовищі Matlab Simulink, будуть визначені параметри електродвигуна згідно з характеристиками DR 63M4.

3.1.5 Перевірка двигуна на нагрів

$$M_{екв} = \sqrt{\frac{M_1^2 T_1 + M_3^2 T_3 + M_4^2 T_4 + M_5^2 T_5 + M_6^2 T_6 + M_7^2 T_7}{T_{цикла}}} = 6,63 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (3.27)$$

$$\frac{M_{екв}}{i} = 1,15 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad M_{ном} = 1,3 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (3.28)$$

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$M_{\text{НОМ}} > \frac{M_{\text{ЭКВ}}}{i}$ – двигун проходить перевірку на нагрів.

3.1.6 Вибір конвертера і схема підключення

Згідно з розрахунковими даними, підійде перетворювач SEW MOVIDRIVE MDX60



Рисунок 3.3 – Перетворювач частоти SEW MOVIDRIVE MDX60

Блок схема підключення SEW MOVIDRIVE MDX60 представлена на рис. 3.4.

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

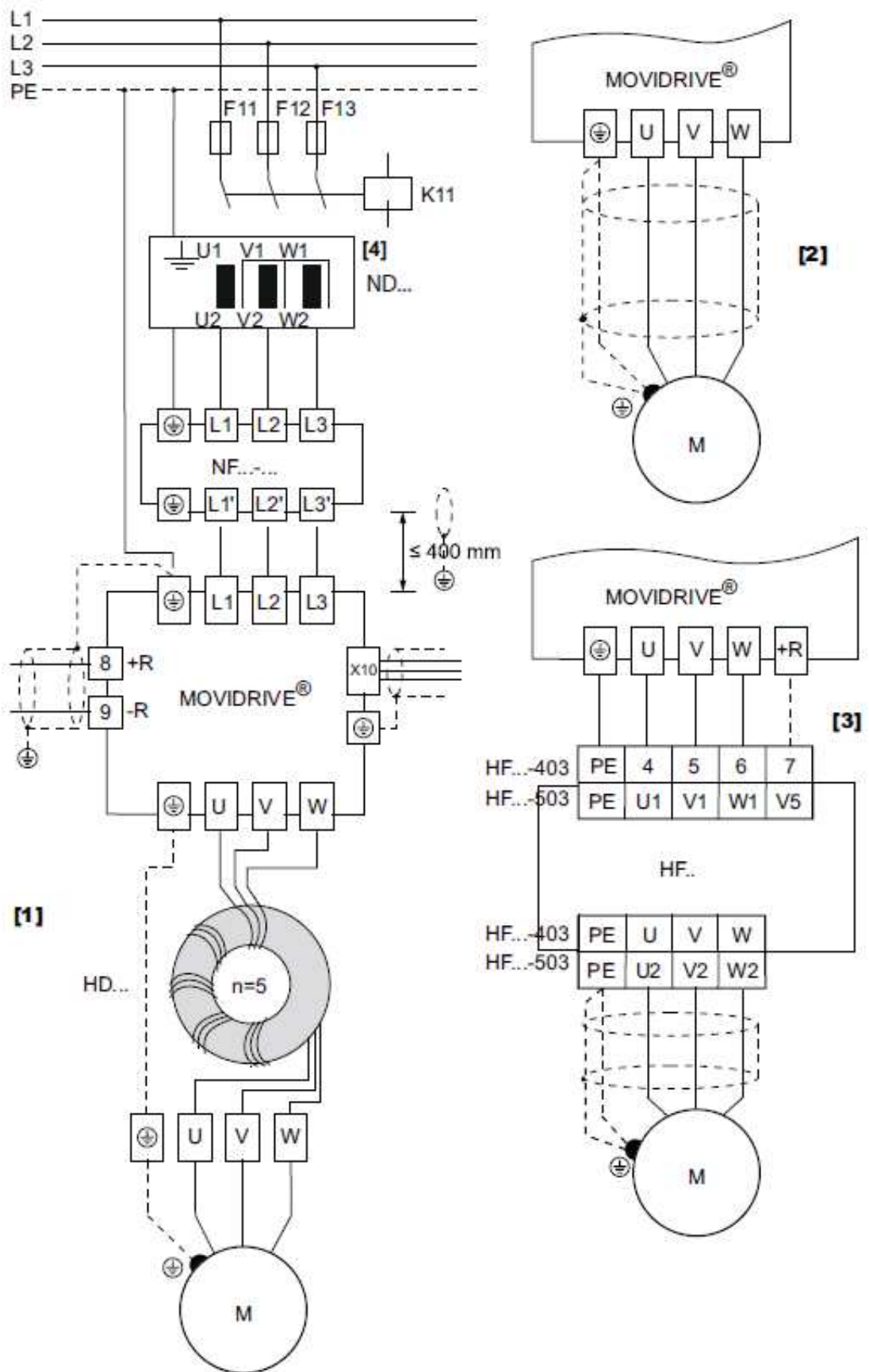


Рисунок 3.4 – Блок схема підключення SEW MOVIDRIVE MDX60

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

3.2 Структурна схема системи управління, вибір структури і розрахунок параметрів регулятора

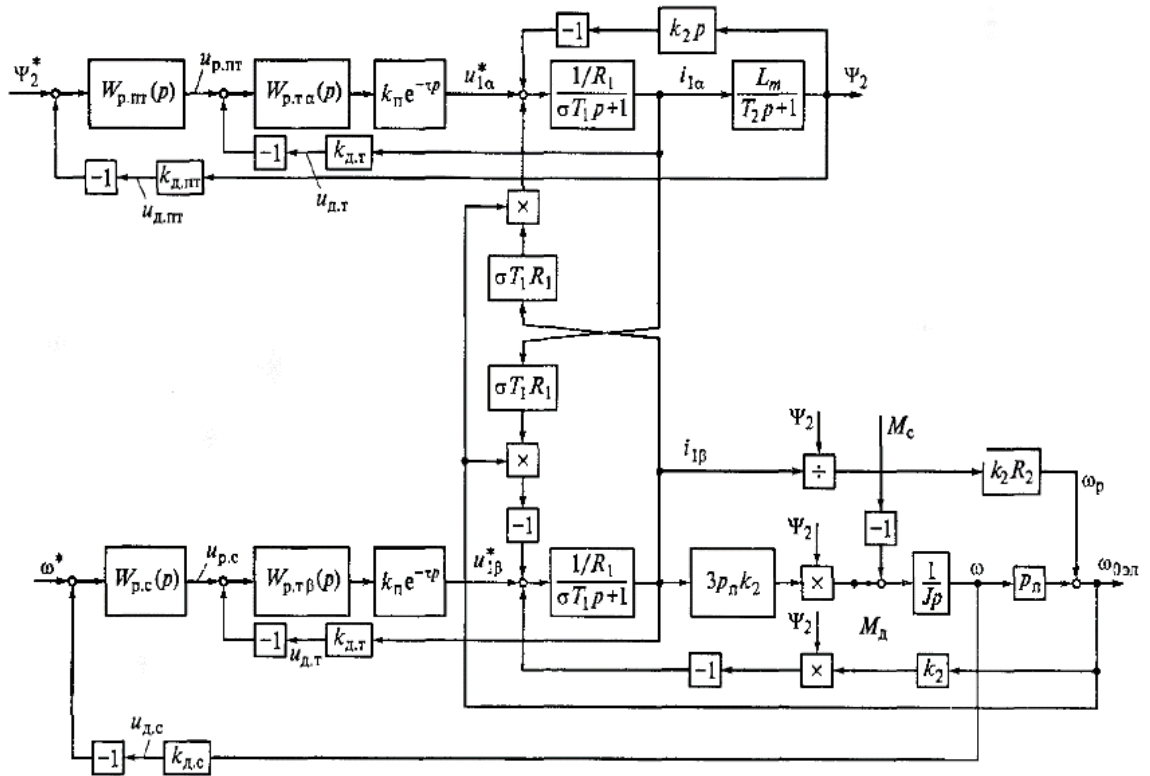


Рисунок 3.5 – Схема структурна системи регулювання швидкості для векторного керування асинхронним двигуном в ефективних значеннях змінних

$$R_1 = 73,6$$

$$R_2 = 57,4$$

$$L_1\sigma = 67,2 * 10^{-3}$$

$$L_2\sigma = 103,1 * 10^{-3}$$

$$L_m = 1693,4 * 10^{-3}$$

$$L_m = 1693,4 * 10^{-3}$$

$$L_1 = L_1\sigma + L_n; \quad L_1 = 1,761 \quad (3.29)$$

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------

$$L_2 = L_2\sigma + L_n; \quad L_2 = 1,796 \quad (3.30)$$

$$T_1 = \frac{L_1}{R_1}; \quad T_1 = 0,024 \text{ c} \quad (3.31)$$

$$T_2 = \frac{L_2}{R_2}; \quad T_2 = 0,031 \text{ c} \quad (3.32)$$

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_2 * L_2}; \quad \sigma = 0,093 \quad (3.33)$$

Налаштування струмової петлі:

$$f = 4 * 10^3$$

$$\tau = \frac{1}{f}; \quad \tau = 2,5 * 10^{-4} \text{ c} \quad (3.34)$$

$$T_{\mu i} = \tau \quad (3.35)$$

$$\tau_{rt} = \sigma * T_1; \quad \tau_{rt} = 2,233 * 10^{-3} \text{ c} \quad (3.36)$$

$$\beta_{rt} = \frac{\sigma * T_1 * R_1}{2T_{\mu i}}; \quad \beta_{rt} = 328,766 \quad (3.37)$$

Налаштування схеми керування потоковою муфтою ротора:

$$T_{\mu\psi} = 2T_{\mu i}; \quad T_{\mu\psi} = 5 * 10^{-4} \text{ c} \quad (3.38)$$

$$\beta_{rpt} = \frac{T_2}{2T_{\mu\psi}L_m}; \quad \beta_{rpt} = 18,482 \quad (3.39)$$

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\tau_{rpt} = T_2; \quad \tau_{rpt} = 0,031 \quad (3.40)$$

$$k_1 = \frac{L_m}{L_1}; \quad k_2 = \frac{L_m}{L_2}; \quad k_1 = 0,962; \quad 0,943k_2 = \quad (3.41)$$

$$A = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sigma T_1} & -314 & \frac{-k_2}{\sigma T_1} & 0 \\ 314 & \frac{1}{\sigma T_1} & 0 & \frac{-k_2}{\sigma T_1} \\ \frac{-k_1}{\sigma T_2} & 0 & \frac{1}{\sigma T_2} & 0 \\ 0 & \frac{-k_1}{\sigma T_2} & 0 & \frac{1}{\sigma T_2} \end{pmatrix}; \quad (3.42)$$

$$A = \begin{pmatrix} 447,734 & -314 & -422,039 & 0 \\ 314 & 447,734 & 0 & -422,039 \\ -329,145 & 0 & 342,206 & 0 \\ 0 & -329,145 & 0 & 342,206 \end{pmatrix};$$

$$B = \begin{pmatrix} 230 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}; \quad \begin{pmatrix} \Psi_{1\alpha} \\ \Psi_{1\beta} \\ \Psi_{2\alpha} \\ \Psi_{2\beta} \end{pmatrix} = A^{-1} * B; \quad \begin{pmatrix} \Psi_{1\alpha} \\ \Psi_{1\beta} \\ \Psi_{2\alpha} \\ \Psi_{2\beta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,096 \\ -0,72 \\ 0,092 \\ -0,692 \end{pmatrix} \quad (3.43)$$

$$\Psi_2 = \sqrt{\Psi_{2\alpha}^2 + \Psi_{2\beta}^2}; \quad \Psi_2 = 0,698 \quad (3.44)$$

Налаштування контуру швидкості:

$$J_{mot} = 3,6 * 10^{-4}; \quad J_{ni} = 6,68 * 10^{-4} \text{ m/c}^2 \quad (3.45)$$

$$J_1 = J_{mot} + \frac{J_{ni}}{5,76^2}; \quad J_1 = 3,801 * 10^{-4} \text{ m/c}^2 \quad (3.46)$$

$$T_{\mu\omega} = 2T_{\mu i}; \quad T_{\mu\omega} = 5 * 10^{-4} \text{ c} \quad (3.47)$$

$$B_{rs} = \frac{J_1}{2T_{\mu\omega} * 6 * k_2 * \psi_2}; \quad B_{rs} = 0,096 \quad (3.48)$$

$$\tau_{rs} = 4T_{\mu\omega}; \quad \tau_{rs} = 2 * 10^{-3} \text{ c} \quad (3.49)$$

3.3 Розрахункова схема системи керування приводом в середовищі MATLAB Simulink

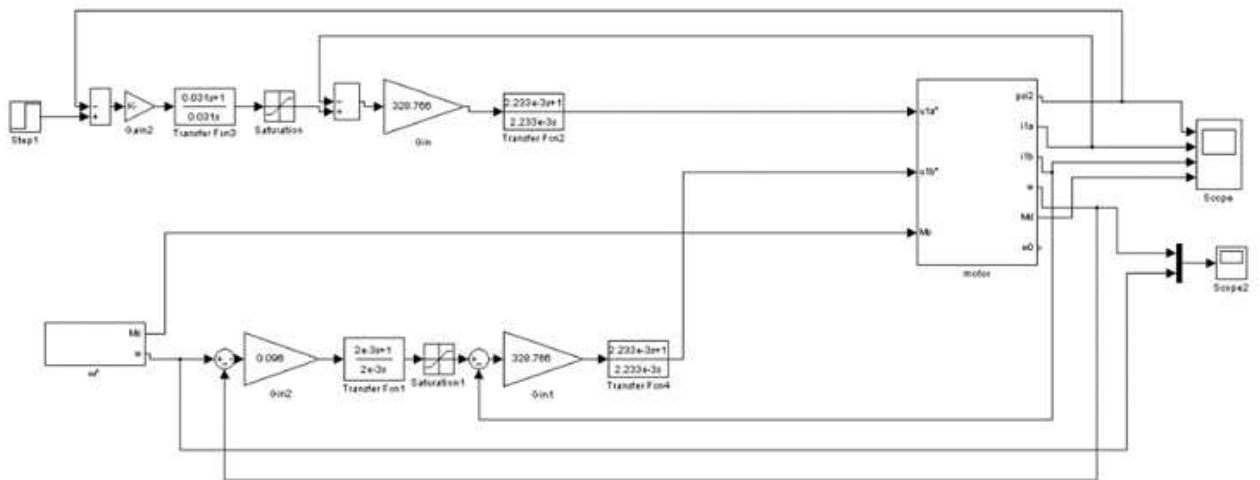


Рисунок 3.6 – Структурна схема системи керування приводом в середовищі MATLAB Simulink

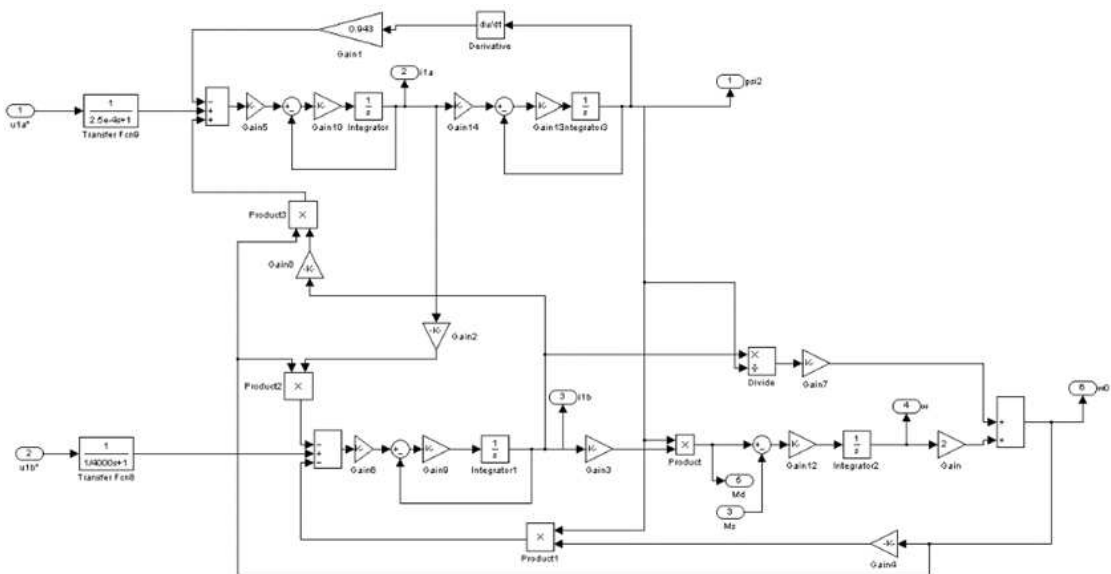


Рисунок 3.7 – Структурна схема керування асинхронного двигуна

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

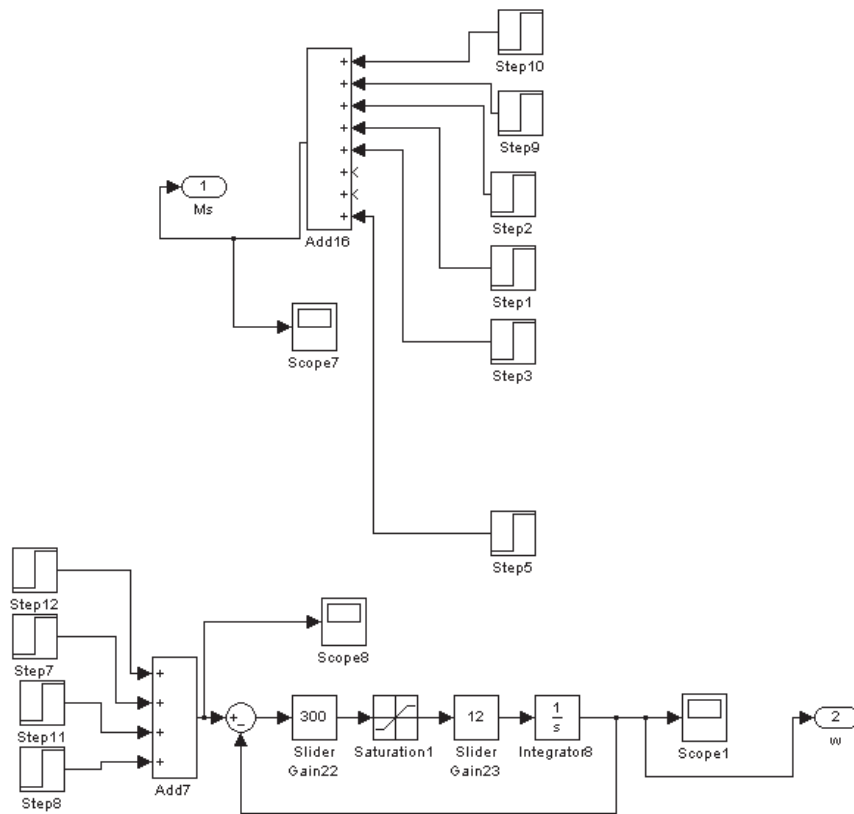


Рисунок 3.8 – Схема структурна датчиків швидкості і крутного моменту

Результати моделювання динамічних процесів при малих входних ефектах і в заданих режимах роботи.

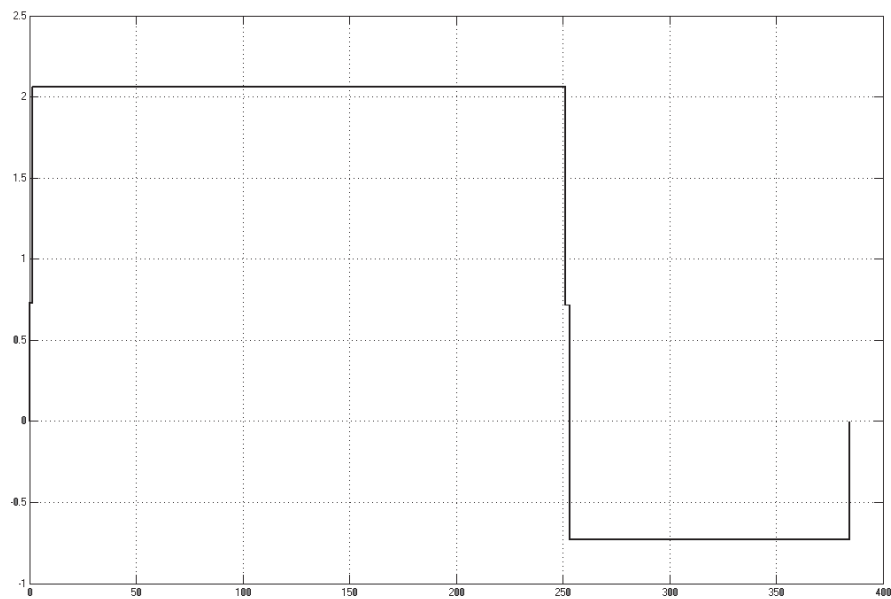


Рисунок 3.9 – Графік моменту виникнення опору

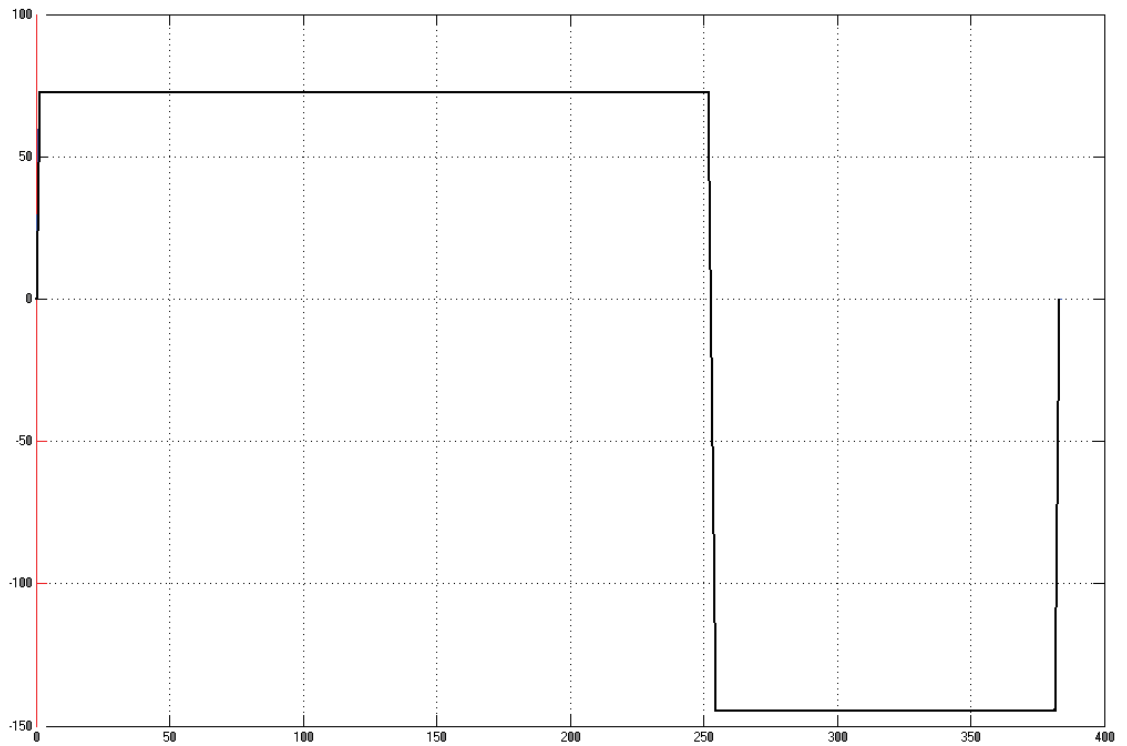


Рисунок 3.10 – Графік швидкостей

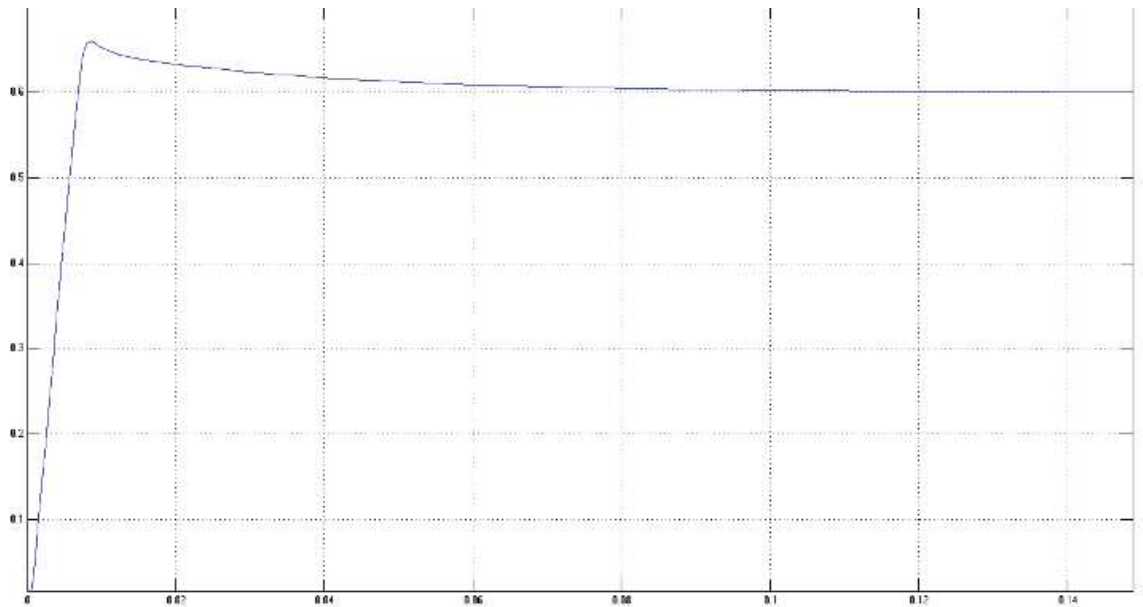


Рисунок 3.11 – Графік реакції потоку на низьке вхідне опромінення

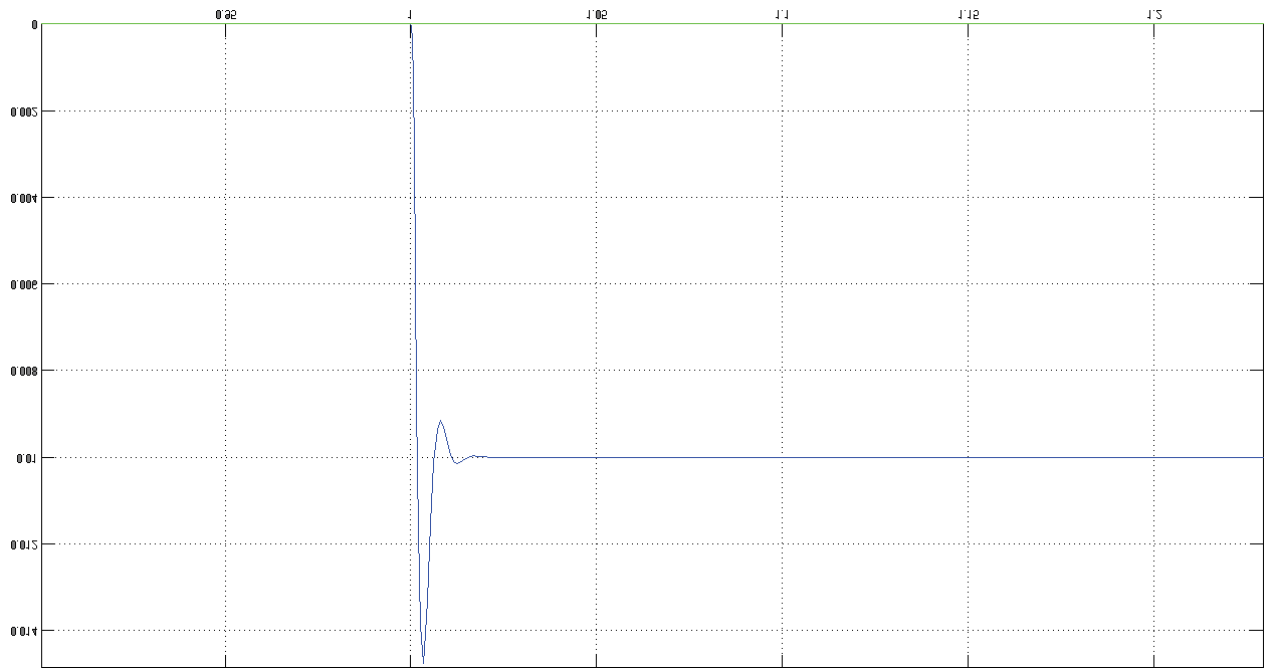


Рисунок 3.12 – Графік реакції швидкості при малому вхідному опроміненні

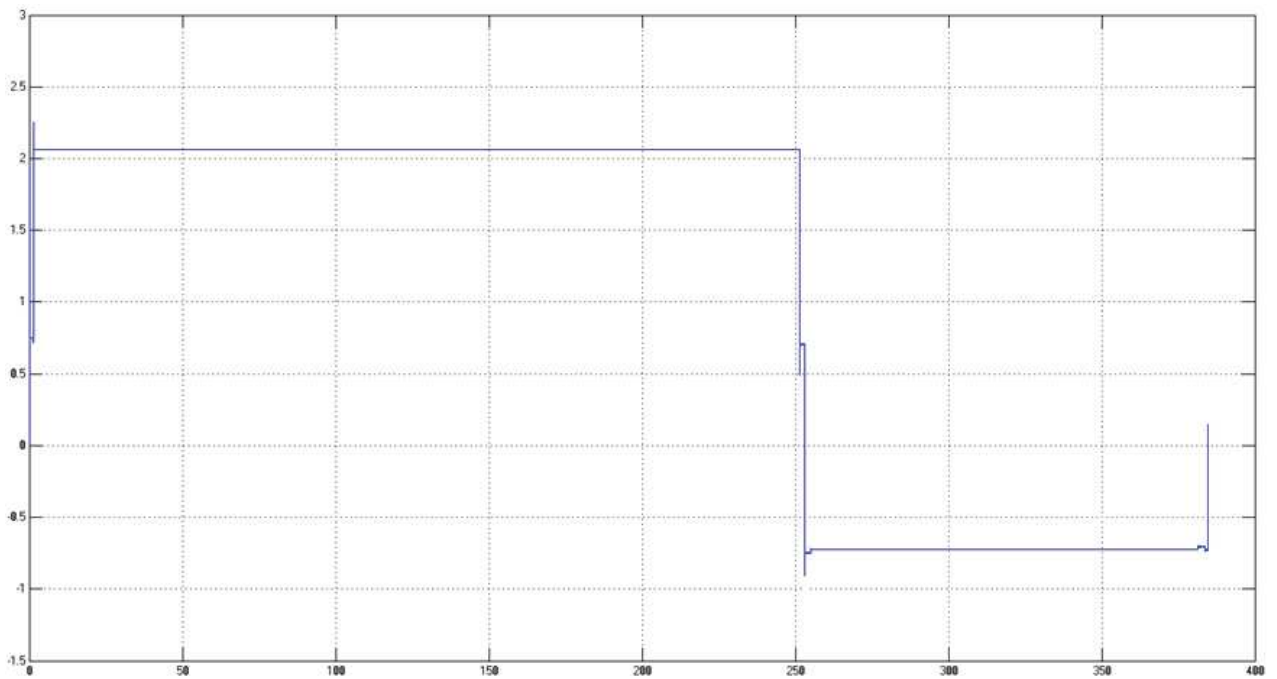


Рисунок 3.13 – Графік крутного моменту двигуна

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

БРМА 25.00.00.000 ПЗ

3.4 Розрахунки параметрів асинхронного двигуна

Вихідними даними для розрахунків АД на частоту струму 400 Гц із восьмиполюсною обмоткою на базі асинхронного двигуна АІР100L8 (навантаження з $\varphi = 30^\circ$) є конструктивні параметри [15]:

АІР100L8 має наступні конструктивні параметри:

$D_a = 168$ мм - зовнішній діаметр сердечника статора;

$D = 113$ мм - внутрішній діаметр сердечника статора;

$l = 100$ мм - довжина сердечника статора;

$h/3b \approx 1$ - форма й розміри паза статора;

$\delta = 0,25$ мм - однобічний повітряний зазор між статором і ротором;

$k_\delta = 1,35$ - коефіцієнт повітряного зазору;

$k_\mu = 1,5$ - коефіцієнт насичення магнітного кола;

$Q = 42$ мм² - площа паза;

$B_\delta = 0,92$ Тл - індукція в повітряному зазорі;

$Z = 48$ - число пазів статора.

Для восьмиполюсної обмотки двигуна від струму збудження:

$$R_p = \frac{Zk_{об}}{2\pi\rho} = \frac{24 \cdot 0,8365}{2 \cdot 3,1416 \cdot 1} = 3,1952;$$

$$R_d^2 = [3^2 + (2^2 + 2^2 - 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot \cos 120^\circ)] / 2 = 10,5;$$

$$\tau_\delta = \frac{R_d^2}{R_p^2} - 1 = \frac{10,5}{3,1952^2} - 1 = 0,0285.$$

Це ж значення коефіцієнта диференціального розсіювання буде і при навантаженні.

Співвідношення ЕРС на виводах $E_B/E_H = 416/208$ В.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

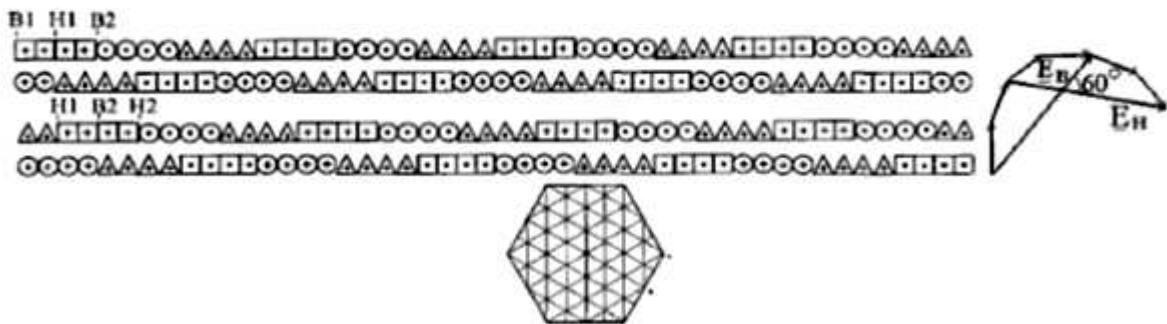
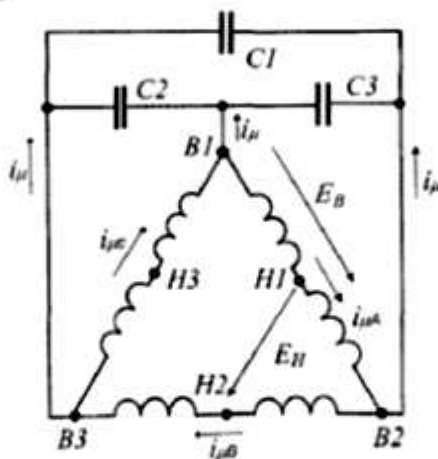
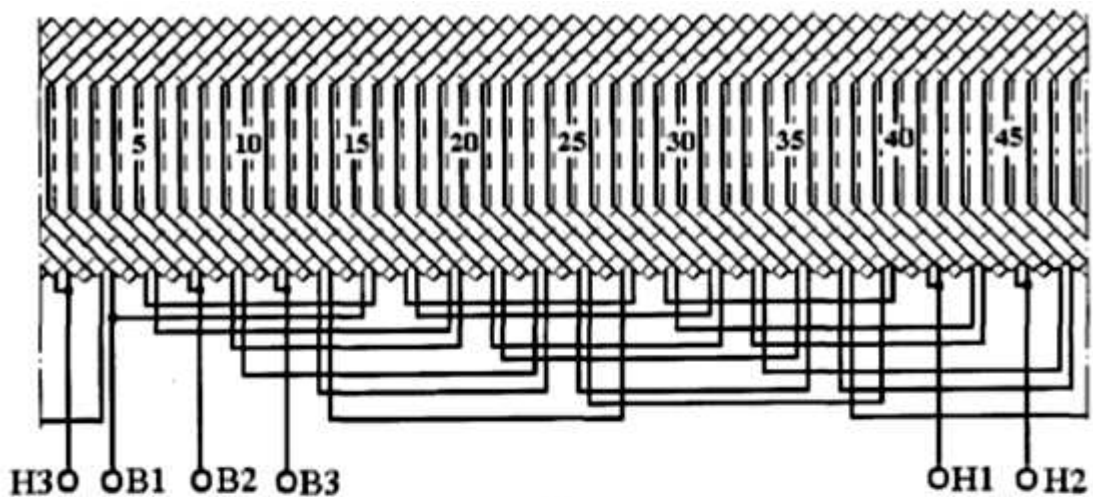


Рисунок 3.14 - Схема восьмиполусної обмотки двигуна ($k_{об} = 0,8365$), схема струмів, векторна діаграма ЕРС та діаграма Гегеса від струму збудження ($\Delta, \beta = 2\pi/3$)

Враховуючи габарити спинки статора базового двигуна, та з метою мінімізації розмагнічування двигуна під час навантаження, вважатимемо індукцію в повітряному зазорі $B_\delta = 1,0$ Тл ($k_\mu = 1,50$).

Потік та кількість витків на фазу ($k_{об} = 0,8365$):

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

$$\Phi = B_{\delta} D l / p;$$

$$\Phi = 1,0 \cdot 0,113 \cdot 0,110 / 4 = 3,10 \cdot 10^{-3} \text{ Вб};$$

$$w = E / 4,44 f k_{\text{об}} \Phi;$$

$$w = 416 \cdot 10^3 / (4,44 \cdot 400 \cdot 0,8365 \cdot 3,10) = 88.$$

У загальному випадку при a паралельних гілках обмотки в пазу розташоване

$$N = 2 m w a / Z.$$

Приймаємо 88 витків, по 11 витків у котушковій групі.

У пазу 11 провідників площею

$$S = Q / 10 = 42 / 11 = 3,8 \text{ мм}^2$$

Приймаємо 4 провідника кожний перетином 0,95 мм діаметром 1,11 мм.

Активний опір однієї фази обмотки ($l_{\phi} = 0,38$ м):

$$R = 0,0287 l_{\phi} w / S; R = 0,0287 \cdot 0,38 \cdot 88 / 3,8 = 0,25 \text{ Ом}.$$

Для двигунів із самовентиляцією потужністю до 5 кВа щільність струму в обмотці приймається $j = 7 \div 10 \text{ А/мм}^2$.

Для дослідного зразка АД задаємося щільністю струму $j = 8 \text{ А/мм}^2$. Тоді номінальний струм генератора

$$I_n = j \cdot S = 8 \cdot 3,8 = 30,4 \text{ А}.$$

Повна потужність двигуна

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$S = 3U_{\phi}I_{\phi}; S=3 \cdot 120 \cdot 30,4=10944 \text{ ВА.}$$

Активна потужність $P = S \cos \varphi = 10944 \cdot 0,8 = 8755,2 \text{ Вт.}$

Опір гілки намагнічування і намагнічуючий струм:

$$x_{\mu} = 2f \frac{\mu_0 D l m w^2 k_{\text{оф}}^2}{\delta k_{\delta} k_{\mu} p^2};$$

$$x_{\mu} = 800 \cdot \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 113 \cdot 10^{-3} \cdot 3 \cdot 88^2 \cdot 0,8365^2}{0,25 \cdot 10^{-3} \cdot 1,35 \cdot 1,5 \cdot 4^2} = 22,78 \text{ Ом;}$$

$$I_{\mu} = E / x_{\mu}; I_{\mu} = 416 / 22,78 = 18,26 \text{ А.}$$

Індуктивний опір обмотки при холостому ході двигуна ($0,67l_{\tau} - 0,43\pi D/2p = 0,09$ і $\tau_{\text{до}} = 0,0285$):

$$x_{10} = 4\pi f \mu_0 \frac{w^2}{p} \left[\frac{l}{q} + (0,6l_{\tau} - 0,43 \frac{\pi D}{2p}) \right] + \tau_{\text{до}} x_{\mu}$$

$$x_{10} = 6,32 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{88^2}{4} \left(\frac{0,12}{1,5} + 0,09 \right) + 0,0285 \cdot 22,6 = 2,08 + 0,64 = 2,72 \text{ Ом.}$$

Скосові пазів ротора на кут $\beta = 360^{\circ} b_{\text{ск}} / \pi D = 360^{\circ} \cdot 12,2 / (3,14 \cdot 113) = 12,4^{\circ}$ відповідають значення обмотувального коефіцієнта, коефіцієнта диференціального розсіювання і індуктивного опору роторної обмотки:

$$k_{\text{оф}} = \frac{\sin \frac{p\beta}{2}}{\frac{p\beta}{2}}; k_{\text{оф}} = \frac{\sin \frac{4 \cdot 12,4}{2}}{4 \cdot 0,2163} = 0,97;$$

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\tau_{\partial 2} = \frac{(\pi p)^2}{\left(k_{\partial 2} Z_2 \sin \frac{\pi p}{Z_2}\right)^2} - 1; \quad \tau_{\partial 2} = \frac{(3,14 \cdot 4)^2}{\left(0,97 \cdot 44 \sin \frac{180 \cdot 4}{44}\right)^2} - 1 = 0,09;$$

$$x_2 = 2\pi f \mu_0 l + \tau_{\partial 2} 2\pi f \frac{Z_2 D l k_{\partial 2}}{\delta k_s k_{\mu} p^2} 10^{-7};$$

$$x_2 = 2512 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 0,1 + 0,09 \cdot 2512 \cdot \frac{44 \cdot 0,113 \cdot 0,1 \cdot 0,97}{0,25 \cdot 10^{-3} \cdot 1,35 \cdot 1,65 \cdot 4^2} 10^{-7} =$$

$$= 1,58 \cdot 10^{-4} + 12,24 \cdot 10^{-4} = 13,82 \cdot 10^{-4} \text{ Ом.}$$

Втрати холостого ходу та активна складова струму холостого ходу базового двигуна АНР100L8 (U_H = 220 В):

$$P_0 = m I_0^2 R_1 + P_c + P_m \approx 3(I_{1н} \sin \varphi_n)^2 R_1 + P_c + P_m =$$

$$= 3(4,0 \cdot 0,66)^2 2,75 + 103 + 6 = 166,5 \text{ Вт};$$

$$I_{0а} = P_0 / m U_n = 166,5 / 3 \cdot 220 = 0,25 \text{ А.}$$

Приведений активний опір та активний опір роторної обмотки базового двигуна ($k = m w^2 k_{\partial 2}^2 / m_2 w_2^2 k_{\partial 2}^2 = 3 \cdot 252^2 \cdot 0,96^2 / 33 = 22340$)

$$R_2 = \frac{P_{\partial 2}}{m(I_{1а} - I_{0а})^2} = \frac{91}{3(4,0 - 0,25)^2} = 2,17 \text{ Ом};$$

$$R_2 = R_2 / k = 2,17 / 22340 = 0,97 \cdot 10^{-4} \text{ Ом.}$$

Активний опір елементів замикаючих кіл та активний опір роторної обмотки для p = 4:

$$R_2 = R_c + R_{\text{хт}} / 2 \left(\sin \frac{\pi p}{Z_2}\right)^2 = R_c + R_{\text{хт}} / 2 \left(\sin \frac{180 \cdot 4}{44}\right)^2 = R_c + 1,35 R_{\text{хт}} = 1,339 \cdot 10^{-4} \text{ Ом.}$$

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

Для частоти струму 400 Гц активний опір роторної обмотки
 $R_2 = 1,48 \cdot 10^{-4} \text{ Ом.}$

Струм ротора двигуна

$$I_2 = \sqrt{\frac{P_{\text{ст}2}}{Z_2 \cdot R_2}} = \sqrt{\frac{91 \cdot 10^4}{44 \cdot 1,48}} = 165,2 \text{ А.}$$

Приведений струм ротора двигуна

$$I'_2 = \frac{I_2}{k_i} = \frac{165}{10,3} = 16 \text{ А.}$$

Реактивна складова та приведена реактивна складова струму ротора
двигуна:

$$I_{2p} = \frac{E_B / k_e \cdot x_2}{R_2^2 + x_2^2 S_H^2} = 15,6 \text{ А;}$$

$$I'_{2p} = \frac{I_{2p}}{k_i} = \frac{15,6}{10,3} = 1,52 \text{ А.}$$

Із виразу:

$$I_\mu = \frac{E}{x_C - x_{10}} = \frac{416}{x_C - 2,72} = 18,26 \text{ А}$$

опір та ємність конденсаторів:

$$x_e = 25,5 \text{ Ом;}$$

$$C = 10^6 / \omega x_e = 10^6 / 2512 \cdot 25,5 = 17,6 \text{ мкФ.}$$

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Напруга на конденсаторах та робоча напруга конденсаторів:

$$U_c = I_{\mu} X_c = 18,26 \cdot 25,5 = 416B;$$

$$U_{cp} \geq 1,41U_c \geq 1,41 \cdot 416 \geq 586B.$$

Приєднуємо конденсатори збудження ємністю 18 мкФ на фазу при з'єднанні за схемою "трикутник" типу KXX з номінальною напругою 630 В.

Втрати в обмотці статора при активному струмі навантаження $I_H=26,88$ А.

$$P_{ст1} = 3 \cdot I_H^2 R_1 = 3 \cdot 26,88^2 \cdot 0,21 = 455Bm$$

При вказаному активному навантаженні втрати в обмотці ротора двигуна

$$P_{ст2} = (I_2' k_i)^2 \cdot Z_2 \cdot R_2 = (16 \cdot 10,3)^2 \cdot 44 \cdot 1,339 \cdot 10^{-4} = 160Bm.$$

При розрахунках обмотки на частоту струму 400 Гц необхідно враховувати зростаючі втрати в сталі. Втрати в зубцях статора (при індукції в зубцях $B_{з1}$ і масі $G_{з1}$) і в спинці статора (при індукції в спинці $B_{с1}$ і масі $G_{с1}$):

$$P_{з1} = 1,7 p_{1,0/50} \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} B_{з1}^2 G_{з1} Bm; \quad P_{с1} = 1,7 p_{1,0/50} \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} B_{с1}^2 G_{с1} Bm,$$

де: коефіцієнт 1,7 урахує вплив технологічного процесу виготовлення сердечника статора, а також нерівномірності розподілу магнітної індукції;

$p_{1,0/50}$ - питомі втрати в сталі при частоті переманічування 50 Гц і

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

індукції $1,0 \text{ Тл}$.

Так, при товщині листів $0,5 \text{ мм}$ сталі марки 2411:

$$P_{s1} = 17,3B_{s1}^2 G_{s1} Bm; \quad P_{c1} = 17,3B_{c1}^2 G_{c1} Bm.$$

Сумарні втрати в сердечнику статора при холостому ході додаткові втрати, що включають, через зубчатості статора і ротора,

$$\sum P_c = P_{s1} \left[1 + 2 \sqrt{\frac{t_1}{10}} (k_\delta - 1)^3 \right] + P_{c1} Bm,$$

де t_1 - зубцеве ділення статора;

k_δ - коефіцієнт повітряного зазору.

Для генераторів на базі стандартних асинхронних двигунів АІР100L8

$$\sum P_c = P_{s1} \left[1 + 2 \sqrt{\frac{7,4}{10}} (1,35 - 1)^3 \right] + P_{c1} = 1,36P_{s1} + P_{c1} Bm;$$

або:

$$\sum P_c = 23,3B_{s1}^2 G_{s1} + 17,3B_{c1}^2 G_{c1} Bm;$$

Маса сталі спинки і зубців статора

$$G_{c1} = 7,8\pi(D_a - h)h_a l \cdot 10^{-6}; \quad G_{s1} = 7,8Zh_{s1}hl \cdot 10^{-6},$$

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$G_{cl} = 7,8 \cdot 3,14(168-17)10,8 \cdot 100 \cdot 10^6 = 3,7 \text{ кг};$$

$$G_{sl} = 7,8 \cdot 48 \cdot 4,2 \cdot 17 \cdot 100 \cdot 10^6 = 2,65 \text{ кг};$$

Втрати в сталі двигуна на базі АІР100L8

$$\sum P_c = 94B_{s1}^2 + 86,5B_{cl}^2 \text{ Вт.}$$

При індукції в повітряному зазорі $B_{\delta} = 1,0$ Тл індукція в зубцях статора двигуна на базі АІТР100L8 становить 1,55 Тл. Індукція в спинці статора рівна відповідно 1,225 Тл. Втрати в сталі генераторів:

$$\sum P_c = 63 \cdot 1,55^2 + 64 \cdot 1,225^2 = 247 \text{ Вт},$$

Сумарні електричні втрати двигуна становлять

$$\Delta P_{ел} = 455 + 160 + 247 = 862 \text{ Вт.}$$

Для визначення ККД необхідно врахувати механічні втрати 300 Вт і додаткові втрати 92 Вт.

ККД двигуна

$$\eta = \frac{P_n}{P_n + P_{ст1} + P_{ст2} + P_c + P_{мех} + P_{доб}} =$$

$$= \frac{8775}{8775 + 455 + 160 + 248 + 300 + 92} = \frac{8775}{10030} = 0,875$$

Енергетична діаграма АД приведена на рис.3.15.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

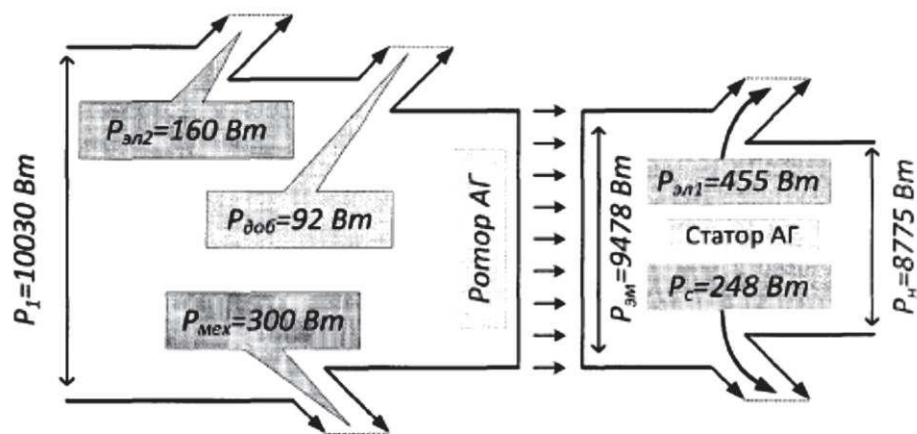


Рисунок 3.15 – Енергетична схема АД

Механічні втрати $P_{мех}$ вважаються такими ж, як і механічні втрати двополусного двигуна аналогічного розміру. Враховується двократне збільшення швидкості обертання (втрати зростають у 4 рази).

Висновки до третього розділу

Проведено необхідні розрахунки та представлено вихідні тексти і алгоритми програм, а також здійснено підбір елементів системи керування з метою збереження вхідних та вихідних значень.

За допомогою комп'ютера в програмному комплексі MATLAB Simulink були розраховані динамічні характеристики джерела, які показують, що відхилення параметрів вихідних значень не перевищує задане.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ВИСНОВКИ

В результаті роботи над бакалаврською роботою проведено огляд асинхронних двигунів з короткозамкненим та фазним ротором. Представлено інформацію про способи керування асинхронним двигуном, а саме реостатний та частотний методи. Розглянуто принцип дії асинхронної машини на використанні обертового магнітного поля.

Було розроблено мікропроцесорну систему керування асинхронним двигуном.

Так як пристрій побудовано на високоінтегрованої мікропроцесорній базі, то були досягнуті хороші вагові, габаритні і функціональні показники.

Проведено аналіз структур систем управління, методів їх впровадження, за результатами якого було зроблено вибір, заснований на міркуваннях мінімальних витрат, зручності впровадження, наявності елементної бази.

Проведено необхідні розрахунки та представлено вихідні тексти і алгоритми програм, а також здійснено підбір елементів системи керування з метою збереження вхідних та вихідних значень.

За допомогою комп'ютера в програмному комплексі MATLAB Simulink були розраховані динамічні характеристики джерела, які показують, що відхилення параметрів вихідних значень не перевищує задане.

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Схемотехніка: Пристрої цифрової електроніки [Електронний ресурс] : в 2 т. : підручник для студентів, що навчаються за спеціальності «Електроніка»/ В. М. Рябенський, В. Я. Жуйков, Ю. С. Ямненко, А. В. Заграничний ; НТУУ «КПІ». – Київ, 2016. – 757 с.

2. Основи схемотехніки електронних систем: Підручник / В.І. Бойко, А.М.Гуржій, В.Я. Жуйков та ін. – К.: Вища шк., 2004. – 527с.

3. Мікропроцесорна техніка [Електронний ресурс] : навчальний посібник для студентів усіх форм навчання та студентів-іноземців напряму підготовки 6.050701 “Електротехніка та електротехнології” / НТУУ «КПІ» ; уклад. В. В. Кирик. – Київ : Політехніка, 2014. – 184 с.

4. Проектування мікропроцесорних систем керування: навчальний посібник/ Медвідь В.Р, Пісцьо В.П., Козбур І.Р. Тернопіль: Вид-во ТНТУ ім. Івана Пулюя, 2015. 354 с

5. Кирик В. В. Мікропроцесорні системи та промислові контролери: Навчальний посібник. Київ: АМУ, 2010. 72 с.

6. Мілих В. І., Шавьолкін О. О. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка: підручник; за ред. В. І. Мілих. 2-е вид. К.: Каравела, 2008. 688 с.

7. Бойко В. І., Гуржій А. М., Жуйков В. Я. та ін.Схемотехніка електронних схем: У 3 кн. Кн.3 Мікропроцесори та мікроконтролери: підручник. 2-ге вид., допов. і переробл. К.: Вища шк., 2004. 399 с.

8. Павельчак А. Г., Самотий В. В., Яцук Ю. В. Програмування мікроконтролерів систем автоматики: конспект лекцій. Львів: Львівська політехніка, 2012. 143 с. 8. ATmega48A/PA/88A/PA/168A/PA/328/P DATASHEET – Atmel Corporation. 657 с.

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

9. Ляшенко О., Мартинюк О. Моделювання та дослідження електронних пристроїв: навч. посібник. Луцьк: Східноєвроп. нац. ун-т ім. Лесі Українки, 2013. 217 с.

10. Цирульник С. М., Азаров О. Д., Крупельницький Л. В., Трояновська Т. І. Мікропроцесорна техніка: навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2017. 123 с.

11. Kunikowski Wojciech, Czerwiński Ernest, Olejnik Paweł, Awrejcewicz. An Overview of ATmega AVR Microcontrollers Used in Scientific Research and Industrial Applications. *Pomiary Automatyka Robotyka*. 2015, Par. 19, P. 15-20. DOI: 10.14313/PAR_215/15.

12. Dogan Ibrahim, Chapter 1. Microcomputer systems, Arm-Based Microcontroller Multitasking Projects. 2021. P. 1–12. DOI: 10.1016/B978-0-12-821227-1.00001-3.

13. Ng T. S. Microcontroller. *Real Time Control Engineering*. 2016. Vol. 65. DOI: 10.1007/978-981-10-1509-0_4.

14. Родькін Д.І., Здор І.Е., Барвінок Д.В. Особливості випробувань, діагностики і паспортизації асинхронних двигунів при використанні комп'ютеризованих вимірювально-діагностичних комплексів // *Наук. Праці Кременчугського політехнічного інституту «Проблеми створення нових машин і технологій»* – Кременчуг: КПІ. – 2001.- вип. 2. – С. 70-72.

15. Савельєв В.А. Дослідження захисту електродвигуна від виткових замикань // *Вісті ВУЗів*. – 2005. - №7. – С. 88-95.

16. Лежнюк П.Д., Комар В.О. Регулювання напруги в електричних системах. Навчальний посібник. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008.– 171с.

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТКИ

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		